



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE FILOSOFÍA Y LETRAS

CENTRO DE INVESTIGACIONES EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

MAESTRÍA EN MANEJO INTEGRADO DEL PAISAJE

**IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO
SWAT: MODELACIÓN Y SIMULACIÓN
MULTITEMPORAL DE LA VARIACIÓN DE
ESCORRENTÍA EN LA CUENCA DEL LAGO DE
CUIZEO**

PRESENTA:

ALBERTO ORTIZ RIVERA

DIRECTOR DE TESIS:

DR. MANUEL E. MENDOZA CANTÚ



CIGA
CENTRO DE INVESTIGACIONES
EN GEOGRAFÍA AMBIENTAL

Morelia, Michoacán

2010



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Agradecimientos

A mi familia que me brindaron su confianza y apoyo incondicional para continuar con mi preparación profesional, sin ustedes no hubiera sido posible obtener estos logros, por lo que este trabajo se los debo a ustedes.

A mi mesa sinodal por brindarme sus experiencia y revisiones para darles forma y estructura al trabajo de tesis.

Dr. Ana Burgos T.

Dr. Erna López G.

Dr. Francisco Bautista Z.

Dr. Manuel E. Mendoza C.

Dr. Miguel Bravo E.

A mis compañeros y amigos, quienes no solo me ayudaron con el trabajo de campo, sino que además intercambiamos puntos de vista, críticas, su apoyo. Gracias por estar.

Al CONACYT por la beca otorgada para la realización y finalización de esta tesis.

A todas aquellas personas que de manera directa o indirecta participaron en la elaboración de la tesis. Muchas gracias a todos.

Contenido

Índice de Cuadros.....	ii
Índice de Figuras	iii
RESUMEN	v
Capítulo I	1
INTRODUCCIÓN.....	1
MARCO TEORICO	4
ANTECEDENTES	13
JUSTIFICACIÓN	18
OBJETIVOS.....	19
HIPÓTESIS.....	20
Capítulo II	21
Descripción del área de estudio.....	21
Materiales y métodos	36
Descripción del modelo SWAT	37
Pre procesamiento e Ingreso de datos	43
Capítulo III	51
Resultados.....	51
Capítulo IV	67
Discusión	67
Conclusiones	72
Referencias bibliográficas	75
ANEXO 1	84
ANEXO 2	87

Índice de Cuadros

Cuadro 1. Datos morfométricos para la Cuenca del lago de Cuitzeo.....	22
Cuadro 2. Nombre de la subcuenca y el área que ocupan	25
Cuadro 3. Municipios que integran la cuenca del lago de Cuitzeo	28
Cuadro 4. Grupos de Suelo de la cuenca, su extensión y porcentaje para la cuenca del lago de Cuitzeo.....	29
Cuadro 5. Unidades de suelo dominante y su grupo hidrológico propuesto	45
Cuadro 6. Reclasificación y generalización a las clases SWAT de las capas de cobertura y uso del terreno	47
Cuadro 7. Estaciones meteorológicas empleadas en este estudio.....	48
Cuadro 8. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT para los distintos años de cambio.....	53
Cuadro 9. Porcentaje por clase de cobertura y uso del terreno para cada año de cambio	56
Cuadro 10. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT para cada año haciendo cambios en las coberturas	58
Cuadro 11. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT manteniendo la cobertura durante todos los años	60
Cuadro 12. Esguerrimiento en mm por subcuenca y el efecto positivo o negativo de este esguerrimiento para el año de 1975 y el 2008.....	61
Cuadro 13. Esguerrimiento en mm por subcuenca y el efecto positivo o negativo de este esguerrimiento para el año de 1975 y 1996.....	64

Índice de Figuras

Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.....	21
Figura 2. Perfil de la cuenca del lago de Cuitzeo.....	22
Figura 3. Perfil 2 de la cuenca del lago de Cuitzeo.....	23
Figura 4. Representación de un lomerío alto cubierto por bosque mixto en la parte norte de la cuenca, en los límites de los Estados de Michoacán y Guanajuato	24
Figura 5. División de la Cuenca de Cuitzeo en subcuencas	24
Figura 6. Hidrografía de la cuenca del lago de Cuitzeo	26
Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del lago de Cuitzeo.....	27
Figura 8. Municipios que forman parte de la cuenca del lago de Cuitzeo	28
Figura 9. Unidades de suelo para la cuenca de Cuitzeo, de acuerdo a FAO, 1990	30
Figura 10. Problemática de erosión presente en algunas zonas de la cuenca. Este problema afecta menos de 2% de la superficie total de la cuenca	31
Figura 11. Vista de algunos bosques y laderas inclinadas en diferentes puntos de la cuenca, desde bosques mixtos en la foto superior en los límites del Estado del Michoacán, pequeños manchones de bosque de juníperos en la foto inferior izquierda y del lado derecho otro bosque mixto estos dentro de la subcuenca de Queréndaro	32
Figura 12. Matorrales subtropicales que se encuentran dentro de la cuenca, este tipo de cobertura vegetal y representativa de la parte centro y norte de la cuenca	32
Figura 13. Pastizales ocupados por actividad pecuaria, en la zona central de la cuenca	33
Figura 14. Imagen de una zona inundable al norte de la cuenca.....	33
Figura 15. Tipos de cobertura y uso del terreno para la cuenca del lago de Cuitzeo 1975	34
Figura 16. Tipos de cobertura y uso del terreno para la cuenca del lago de Cuitzeo 2008	34
Figura 17. Método general empleado en esta investigación	42
Figura 18. Vista del proceso de generación del MDE.....	44

Figura 19. Diferentes perfiles de suelo realizados durante el trabajo de campo, estos complementaron la base de datos de INEGI, todos estos realizados en la subcuenca de San Marcos	45
Figura 20. Reclasificación de la cobertura y uso del terreno bajo la interfaz de ArcSWAT	46
Figura 21. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio.....	49
Figura 22. Ejemplificación gráfica de la generación semiautomatizada por ArcSWAT.....	50
Figura 23. Delimitación de subcuencas por la extensión ArcSWAT	51
Figura 24. Mapa de distribución de la precipitación y temperatura realizada por la extensión ArcSWAT.....	52
Figura 25. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT para los distintos años de cambio.....	53
Figura 26. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para los diferentes años de cambio	55
Figura 27. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT para cada año haciendo cambios en las coberturas.....	57
Figura 28. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT manteniendo la cobertura durante todos los años.....	59
Figura 29. Mapa de distribución de escurrimiento de la diferencia de los años 1975 y 2008	62
Figura 30. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para 1975 y 2008.....	63
Figura 31. Mapa de distribución de escurrimiento de la diferencia de los años de 1975 y 1996	65
Figura 32. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para 1975, 1996 y 2008.....	66

RESUMEN

El agua cubre aproximadamente el 75% de la superficie terrestre; es fundamental tanto para procesos ambientales, sociales e indispensable para el surgimiento y desarrollo de la vida.

Casi todos los países vienen reconociendo a las grandes cuencas hidrográficas como los territorios más apropiados para conducir los procesos de manejo, aprovechamiento, planeación y administración del agua. Una herramienta que se utiliza, son programas de modelación hidrológica que utilizan variables temporales y espaciales para simular el flujo de agua, así como las entradas y salidas de un área determinada y que a su vez están integrados en Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Para ese estudio se decidió emplear el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT), el cual se diseñó para ser aplicado en cuencas hidrográficas grandes, además es avalado por su amplia aplicación a cuencas de todo el mundo con las más diversas características, contempla e integra un número muy considerable de submodelos y parámetros.

La cuenca del lago de Cuitzeo, es una cuenca endorreica lacustre, con una superficie de 4 000 km². Tiene un gradiente altitudinal que va de los 1300 a los 3600 msnm. Es una cuenca relativamente plana y con poca amplitud de relieve. La mayor densidad de escurrimientos se localiza hacia la porción elevada del sur de la cuenca; los escurrimientos en la porción norte son escasos, con un patrón poco desarrollado. El clima predominante corresponde al templado con lluvias en verano. La cuenca tiene una importante superficie ocupada por actividades rurales; sin embargo, la población de la cuenca es predominantemente urbana y tiende a concentrarse en 26 asentamientos.

Para este caso el SIG utilizado es ArcGIS y extensión ArcSWAT; los insumos requeridos son el Modelo Digital de Elevación, mapas de tipo de suelo, cobertura y uso del suelo, además de datos de lluvia, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Se simularon cinco años de cambio, comprendidos entre 1975 y el 2008. Los valores de escurrimiento anual nos dan una perspectiva global y reducida, sin embargo las tendencias de los datos al hacer el análisis para un año cambiando la cobertura (es decir, precipitación constante), con un escurrimiento menor para el año de 1996 en todos los casos y para el 2008

un escurrimiento superior, pero menor al de 1975. Estos resultados sugieren que la cobertura vegetal actual de la cuenca está en una mejor condición que en la década de los 70s.

Sin embargo, hay otros factores que afectan las simulaciones y no solo atribuirlo a los cambios de cobertura y uso del terreno. Además el área de influencia de cada subcuenca y el aporte de escurrimiento de cada una también puede ser un factor, así como la distribución y agrupamiento de los parámetros climáticos por parte del modelo. Para el caso de simulaciones dejando permanente la cobertura para todos los años muestran la misma tendencia que para las simulaciones sin ningún cambio.

Si bien los parámetros del modelo SWAT no fueron calibrados, ni se realizó un análisis de sensibilidad para conocer cuales parámetros son más sensibles a cambios pequeños, el funcionamiento de un modelo sin calibración es un importante indicador de que tan bien funciona el modelo cuando no hay datos de aforo, como es el caso de muchos países. Esto es particularmente útil para el modelo SWAT, porque su uso está recomendado para cuencas que no cuentan con registros de aforo.

Establecer las consecuencias físicas y económicas de la degradación de las cuencas nos permitiría conocer la importancia de los servicios ecológicos que brindan. Además sería un primer paso encaminado hacia la planificación y manejo de cuenca.

Hidrología; Modelos Hidrológicos; Cuenca; Escurrimiento; SIG; modelo SWAT

Capítulo I

INTRODUCCIÓN

Contrario a lo que puede parecer a simple vista, el agua es un recurso finito. Se ha estimado que existen alrededor de mil 400 millones de kilómetros cúbicos de agua en el planeta, de los cuales sólo 2.5% es agua dulce. Este pequeño porcentaje se localiza principalmente en los ríos, lagos, glaciares, mantos de hielo y acuíferos del planeta. Casi tres cuartas partes del agua dulce del planeta están contenidas en los glaciares y mantos de hielo, de los cuales alrededor de 97% son inaccesibles para su uso, ya que se encuentran en la Antártica, el Ártico y Groenlandia. Los glaciares continentales, así como el hielo y las nieves perpetuas de volcanes y cadenas montañosas constituyen una fuente explotable de agua, por lo que son parte importante de los recursos hídricos de muchos países (SEMARNAT, 2008).

El movimiento del agua entre la superficie del planeta y la atmosfera es descrito con el apoyo del modelo conceptual del ciclo hidrológico. Este ciclo depende de una serie de factores bióticos, abióticos y climáticos cuyas características facilitan o dificultan el flujo de agua de la tierra a la atmósfera y viceversa. Algunos de los elementos que participan de manera directa o indirecta en el ciclo hidrológico son: los suelos, topografía, cobertura vegetal, clima, cuerpos de agua, sol y otros (Gayoso *et al.*, 2000).

En Mexico, los cálculos de los compartimientos y flujos indican que la precipitación media anual estimada varía entre 772 y 777mm, con un escurrimiento medio de entre 953 000 m³ a 1 570 000 Mm³, distribuidos en las 320 cuencas hidrográficas que constituyen nuestro país, en cuya parte más baja, el cuerpo receptor es casi siempre un río o un arroyo. De 60 a 72% de esa precipitación se pierde por evaporación y de 10 a 20% por infiltración; el promedio de agua restante entre el 10 y 28% llega a los ríos, es decir, entre 410 000 y 420 000 Mm³ (Alcocer, 2002; Aldama, 2002).

Sin embargo, ya que México se caracteriza por un patrón de distribución climática que obedece a la complejidad de su fisiografía, topografía y su ubicación latitudinal, la precipitación se distribuye de manera desigual a lo largo del territorio nacional, en consecuencia la distribución de la esorrentía superficial es heterogénea sobre el territorio nacional.

La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca. Donde la conceptualización de cuenca hidrográfica está referida a un espacio físico perfectamente definido por sistemas topográficos y geológicos que permiten delimitar territorialmente una superficie de drenaje común, en donde interactúan los sistemas físicos-bióticos y socioeconómicos. Por lo tanto el espacio de las cuencas hidrográficas, dentro del proceso de administración racional de los recursos naturales, se debe tomar como la unidad de planeamiento dentro de la cual se puede plantear la definición del uso de los recursos y determinar el efecto que tal uso origina sobre los propios recursos (Villarroel, 2003).

La gestión del agua se considera un proceso fundamental para la planeación y el manejo de los recursos naturales con fines de sostenibilidad (Brooks *et al.*, 1991). El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua, para predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes, sequías) y preservar la calidad del agua (Baker *et al.*, 1995).

De acuerdo con la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), y el Comité Cuenca Agua del Valle de México (CAVM), en el mundo moderno, casi todos los países están reconociendo a las grandes cuencas hidrográficas como los territorios más apropiados para conducir los procesos de manejo, aprovechamiento, planeación, administración del agua y recursos asociados (suelo, vegetación).

Como herramientas de ayuda para el análisis de los recursos hídricos se utilizan programas de modelación hidrológica, que utilizan variables temporales y espaciales para simular el flujo de agua, así como las entradas y salidas, de una cuenca determinada, ya sea grande o pequeña.

El uso de modelos se ha incrementado en las últimas décadas gracias al perfeccionamiento de los sistemas de cómputo y a la necesidad de complementar el entendimiento que tenemos sobre la naturaleza. Si bien el uso principal de los modelos es comunicar un punto de vista de la realidad y en el mejor de los casos resulta sólo una aproximación a ésta. No obstante esta última característica, muchos de ellos son útiles para entender un problema en particular o para predecir el comportamiento de un sistema. En cualquiera de los dos casos, el usuario debe de estar consciente de estas limitaciones (Pérez-Maqueo *et al.*, 2006).

Además del uso de los modelos para interpretar la complejidad de una situación, en ocasiones se pueden extrapolar los resultados a escalas espaciales o temporales mayores o niveles de organización más altos.

Cuando se necesita información de los parámetros hidrológicos a nivel de detalle, para sitios específicos o para la totalidad de un territorio, el cálculo y la aplicación tradicional de las fórmulas resulta muy complejo e incluso impracticable. El uso de herramientas técnicas como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), genera información de manera relativamente rápida y con cierto grado de incertidumbre, pero no tan costosa, incluso sin contar con datos reales, sino estimados a través de la consideración de supuestos básicos asociados a las características climáticas, tipos de suelos, áreas de escurrimiento, pendientes, etc., en cuyo caso se tendría una primera aproximación o evaluación preliminar, implementar medidas, llevar a cabo el seguimiento o monitoreo y con el paso del tiempo hacer adaptaciones o afinar el modelo o modelos espaciales construidos que sean más propias de las condiciones del lugar (Belmonte, S. y Núñez V., 2006).

MARCO TEORICO

¿Qué es la Hidrología?

La definición de hidrología de acuerdo con la UNESCO (1968), hace referencia a que es una ciencia que trata el agua de la Tierra, tanto sus propiedades químicas y físicas, y las reacciones con el ambiente, incluyendo sus relaciones con los elementos vivos. El dominio de la hidrología abarca la historia del agua sobre toda la vida en la Tierra.

Eagleson (1991), define que la hidrología es la ciencia que trata la incidencia, la distribución, la circulación y las propiedades del agua en la Tierra. Evidentemente, es una ciencia multidisciplinaria, ya que a través del ciclo hidrológico es importante y afectado por factores físicos, químicos y biológicos en todos los compartimentos del sistema Tierra: atmósfera, los glaciares y las capas de hielo, la tierra sólida, ríos, lagos y océanos.

Según el Committee on Opportunities in the Hydrologic Sciences (COHS, 1991) la hidrología es descrita como en una geociencia distinta con un fuerte carácter interdisciplinario. La corriente base de la hidrología mezcla los aspectos naturales y las alteraciones físicas, químicas y de los sistemas biológicos, además incorpora cuestiones de ingeniería, así como de las ciencias sociales.

Literalmente hablando la hidrología es la ciencia del agua. Etimológicamente se denomina hidrología (del griego ὕδωρ (hidro): agua, y λογος (logos): estudio) a la ciencia geográfica que se dedica al estudio de la distribución, espacial y temporal, y las propiedades del agua presente en la atmósfera y en la corteza terrestre. Incluye las precipitaciones, la escorrentía, la humedad del suelo, la evapotranspiración y el equilibrio de las masas glaciares. Por otra parte, el estudio de las aguas subterráneas corresponde a la hidrogeología.

Aunque cabe destacar que el elemento central de la hidrología es el agua y su movimiento cíclico entre la Tierra y la atmósfera, con el fin de cuantificar y cualificar al recurso hídrico para su aprovechamiento sustentable.

Algunos ejemplos de aplicación de estudios hidrológicos son:

- El diseño de obras hidráulicas, para efectuar estos estudios se utilizan frecuentemente modelos matemáticos que representan el comportamiento de toda la cuenca sustentada por la obra en examen.
- La operación optimizada del uso de los recursos hídricos en un sistema complejo de obras hidráulicas, sobre todo si son de usos múltiples. En este caso se utilizan generalmente modelos matemáticos conceptuales, y se procesan en tiempo real.

- El correcto conocimiento del comportamiento hidrológico de como un río, arroyo o de un lago es fundamental para poder establecer las áreas vulnerables a los eventos hidrometeorológicos extremos.
- Prever un correcto diseño de infraestructura vial, como caminos, carreteras, ferrocarriles, etc.

Estás y muchas aplicaciones más hacen que el hidrólogo sea un personaje importante en todo equipo multidisciplinar que enfrenta problemas de ingeniería civil en general y problemas de carácter ambiental a través de la aplicación de modelos, a continuación se explican los conceptos de modelo y modelos hidrológicos.

¿Qué es un Modelo?

El análisis de los sistemas ha sido utilizado en todos los campos del conocimiento para ordenar, jerarquizar y vincular las unidades que forman un proceso físico, químico, biológico o social (von Bertalanfy, 1976), y así tratar de interpretar la estructura y el funcionamiento de un fenómeno que en muchas ocasiones, es muy complejo para ser examinado en su totalidad. De esta manera, en el desarrollo de una investigación es necesario abstraer determinadas características de un sistema en particular para su estudio.

Al hacer más formal este proceso se crea una situación “ideal” del universo considerado, simplificando su estructura y expresando las interacciones entre sus componentes, es decir, se genera un modelo.

Un modelo se podría definir de distintas formas, aunque su esencia es la misma:

- Representación física, matemática o de cualquier otro tipo lógico, de un sistema, entidad, fenómeno o proceso.
- Representación de un sistema real que es equivalente a este sistema en todos sus aspectos relevantes.
- Representación simplificada de un sistema desde un punto de vista particular en el tiempo y el espacio para proporcionar el entendimiento del sistema real
- Representación de la construcción y el funcionamiento de cierto sistema de interés.

En ocasiones se encuentra en la literatura la definición de modelo conceptual, el cual es un conjunto de elementos y relaciones que se perciben en un sistema ya sea en términos de palabras, dibujos o diagramas; donde la morfología y la estructura del

sistema podrán inferirse a partir de observaciones cuidadosas del fenómeno (Jørgensen, 1988).

Los modelos pueden ser físicos, cuando manifiestan a escala las propiedades físicas del sistema real, gráficos, cuando constituyen diagramas gráficos que describen la estructura a alto nivel o el funcionamiento del sistema o matemáticos, cuando son un conjunto de expresiones matemáticas o lógicas que expresan las relaciones entre las entidades del sistema.

Los modelos empíricos son aquellos que predicen cómo una variable afecta una respuesta y no por qué la afecta, por lo que no se logra entender la totalidad de un sistema, además de que puede tener menor capacidad predictiva. Son modelos que se basan en aproximaciones empíricas producto de la observación o experimentación y se pueden considerar como un conjunto de ecuaciones heurísticas; cada una de esas ecuaciones es usualmente la descripción estática de una relación entre el proceso considerado y las condiciones ambientales.

Para la construcción de modelos matemáticos existen dos estrategias (Pavé, 1994); la primera, guiada por los datos, que consiste en buscar un modelo correlativo que describa las relaciones existentes entre dos o más componentes del sistema a partir de los resultados obtenidos mediante el proceso experimental o la observación. Una segunda estrategia, estriba en generar un modelo explicativo del funcionamiento del sistema y así planear un conjunto de hipótesis plausibles acerca de los mecanismos causales de las relaciones. La finalidad de estos, además de describir las relaciones, es explicarlas tanto conceptual como matemáticamente.

Dentro del grupo de los modelos explicativos, existen dos categorías principales:

1. Los modelos determinísticos, los cuales son regidos principalmente por la causalidad. Es decir, una cierta entrada responde con una única salida.
2. Los modelos estocásticos, en los que la respuesta de un sistema a una entrada puede tener un conjunto de valores, regidos por cierta probabilidad de ocurrencia.

Vale la pena destacar que los modelos determinísticos son en general más sencillos pero menos realistas que los estocásticos. Además se pueden adicionar otros modelos considerados como matemáticos:

- Modelos matriciales, donde se utilizan las matrices en las formulaciones matemáticas, lo que permite manejar simultáneamente dos dimensiones.

- Modelos estáticos, en donde las variables definidas no dependen del tiempo.
- Modelos dinámicos, al contrario de los estáticos aquí las variables definidas dependen del tiempo.
- Modelos lineales, en los cuales en su planteamiento se utilizan ecuaciones de primer grado.
- Modelos no-lineales, en donde, para su planteamiento por lo menos una de las ecuaciones es de orden diferente de uno.

Las ventajas del uso de modelos en la investigación pueden sintetizarse en los siguientes cuatro puntos (Jørgensen, 1988), puesto que:

1. Permiten examinar y sintetizar sistemas complejos
2. Revelan las propiedades más importantes del sistema
3. Señalan las debilidades en el conocimiento, por lo que asisten en el proceso de priorización de los objetivos de una investigación.
4. Permiten probar hipótesis, dado que permiten simular las reacciones del sistema ante variaciones en la magnitud de los estímulos.

Existen ciertas distinciones entre modelo y simulación que merecen ser aclaradas. En el nivel de definición, el primero se restringe a descripciones de ideas generales, que por lo tanto, incluyen los menos detalles posibles. La segunda se refiere a descripciones matemáticas de uso práctico que incluyen todos los detalles relevantes posibles.

Ahora será complementar estos dos conceptos en uno y referirnos a los modelos de tipo hidrológicos.

¿Qué es un Modelo Hidrológico?

Un modelo hidrológico puede ser definido como una simplificación de un sistema natural. Tradicionalmente, los modelos hidrológicos se agrupan en modelos basados en procesos físicos y modelos conceptuales (Bergstrom, 1991). Los cuales ya se explicaron de forma más amplia, anteriormente.

Existe un número importante de modelos de simulación, los cuales varían, en los procesos que simulan, en la escala de trabajo en que pueden aplicarse, y asociado a

ello, en la manera y detalle en como agregan la variabilidad espacial de los parámetros de entrada.

Los modelos de simulación hidrológica se componen de una serie de ecuaciones que calculan e interrelacionan, de manera computarizada, los diversos procesos de movimiento del agua que ocurren en una unidad de tierra. En general, resuelven el balance hidrológico del área mediante ecuaciones que resuelven a su vez los componentes de dicho balance, es decir, funciones matemáticas que relacionan, generan o resuelven los términos de precipitación, evaporación, evapotranspiración, escurrimiento, infiltración, drenaje profundo, almacenamiento y flujo de base.

De acuerdo a Jackson (1982), existen dos tipos principales de modelos hidrológicos, que a continuación se describen brevemente:

- Modelos basados en datos. Estos modelos son sistemas de caja negra, que usan conceptos matemáticos y estadísticos para asociar una determinada entrada (por ejemplo, precipitación) con un modelo de salida (por ejemplo, escorrentía). Las técnicas que suelen usarse son la regresión, funciones de transferencia, redes neurales e identificación de sistema. Estos modelos son conocidos como modelos de hidrología empíricos.
- Modelos basados en descripciones del proceso. Estos modelos tratan de representar los procesos físicos observados en el mundo real. Contienen representaciones de escorrentía superficial, flujo subsuperficial, evapotranspiración y flujo de canal, pero pueden ser mucho más complicados. Estos modelos son conocidos como modelos hidrológicos deterministas.

Existen modelos que no permiten representar variabilidad espacial y por lo tanto, sólo simulan un sector con valores únicos de los factores de erosión y escurrimiento. Por lo tanto, sólo son aplicables en los niveles de escala de parcela de cultivo o como máximo, de unidad de tierra con cobertura y manejo homogéneo. Estos modelos asumen que el terreno que se simula es homogéneo y se denominan agregados.

Otros modelos, denominados distribuidos, incorporan la variabilidad espacial de las diferentes variables y reproducen más fielmente los procesos que tienen lugar dentro la cuenca. Para el caso de las cuencas éstas son regularmente divididas en subcuencas y unidades de respuesta hidrológica.

Una tercera posibilidad son los modelos semidistribuidos que se construyen a partir de la aproximación de diversos modelos agregados, por ejemplo diversas subcuencas de una cuenca hidrográfica. En un modelo semidistribuido las diferentes unidades generan

sus propias salidas de forma agregada pero aparecen entradas y salidas de unas a otras.

Con respecto al tiempo, podemos decir que es la combinación existente entre la mínima unidad de tiempo y el período de tiempo que el modelo está en capacidad de simular. El detalle en que los modelos reciben la información climática para su funcionamiento y el período en que agregan sus salidas, determinan la temporalidad de los mismos. Pueden haber diversas combinaciones entre el detalle de las entradas y salidas, que en general, originan modelos de tipo “por evento” y “continuos”.

La principal utilidad de los modelos de simulación en general, es que permiten utilizar e integrar de manera sistemática cierta cantidad de datos básicos y producir información cuantitativa. El uso de modelos hidrológicos puede dividirse en dos categorías generales:

- a) toma de decisiones
- b) investigación y entrenamiento.

Las aplicaciones en toma de decisiones pueden clasificarse en planeamiento, diseño y operación. En todos ellos, se requiere de predicciones con precisión razonable sobre la respuesta del sistema ante variaciones de alguna o varias entradas. En aplicación de modelos con fines de investigación y entrenamiento, se busca un mejor entendimiento del ciclo hidrológico.

Una aplicación típica de la modelación de cuencas consiste en lo siguiente (Ponce, 1989):

- 1) Selección del tipo de modelo
- 2) Formulación del modelo y construcción
- 3) Prueba del modelo
- 4) Aplicación del modelo.

Los modelos de cuencas comprensivos incluyen todas las fases relevantes del ciclo hidrológico, y, como tales, están compuestos de una o más técnicas para cada fase.

En la práctica idealmente se debería:

- 1) Seleccionar un modelo disponible, con conocimiento de su estructura, operación, capacidades, y limitaciones

2) Desarrollar un modelo o modificar uno ya existente, basado en necesidades percibidas, disponibilidad de datos y restricciones de presupuesto.

La mayoría de las aplicaciones rutinarias son del primer tipo, en cuyo caso es necesario familiarizarse con las características del modelo y su composición. Los modelos probados tienen manuales que describen la interacción entre el usuario y el modelo. Además, algunos modelos pueden tener manuales de referencia que proveen información adicional sobre la estructura interna del modelo.

Los SIG y la Hidrología se basan en principios fundamentales muy diferentes; sin embargo, existe un vínculo entre los dos. Los SIG describen el medio ambiente, mientras la Hidrología describe cómo el ambiente afecta el flujo de agua a través del ciclo hidrológico. Un objetivo fundamental en la Hidrología Espacial es el uso de los datos espaciales y funciones de los SIG, a fin de ayudar a generar nuevas ideas y estrategias para solucionar problemas dentro de la Hidrología (Murillo, 2002).

Ventajas y desventajas del uso de la simulación

Aunque la técnica de simulación generalmente se ve como un método de último recurso, recientes avances en las metodologías de simulación y la gran disponibilidad de programas de cómputo de uso actual que existe en el mercado, han hecho que la técnica de simulación sea una de las herramientas más ampliamente usadas en el análisis de sistemas (Naylor *et al.*, 1966).

- A través de un estudio de simulación, se puede estudiar el efecto de cambios internos y externos del sistema, al hacer alteraciones en el modelo del sistema y observando los efectos de esas alteraciones en el comportamiento del sistema.
- Una observación detallada del sistema que se está simulando puede conducir a un mejor entendimiento del sistema y por consiguiente a sugerir estrategias que mejoren la operación y eficiencia del sistema.
- La técnica de simulación puede ser utilizada como un instrumento pedagógico para enseñar a estudiantes habilidades básicas en análisis estadísticos, análisis teórico, etc.
- La simulación de sistemas complejos puede ayudar a entender mejor la operación del sistema, a detectar las variables más importantes que interactúan en el sistema y a entender mejor las interrelaciones entre estas variables.
- La técnica de simulación puede ser utilizada para experimentar con nuevas situaciones, sobre las cuales tiene poca o ninguna información. A través de esta experimentación se puede anticipar mejor a posibles resultados no previstos.

- Cuando nuevos elementos son introducidos en un sistema, la simulación puede ser usada para anticipar cuellos de botella o algún otro problema que puede surgir en el comportamiento del sistema.
- Los sistemas los cuales son sujetos de investigación de su comportamiento no necesitan existir actualmente para ser sujetos de experimentación basados en la simulación. Solo necesitan existir en la mente del diseñador.
- El tiempo puede ser reducirse en los modelos de simulación. El equivalente de días, semanas y meses de un sistema real en operación frecuente pueden ser simulados en solo segundos, minutos u horas en una computadora. Esto significa que un largo número de alternativas de solución pueden ser simuladas y los resultados pueden estar disponibles de forma breve y pueden ser suficientes para influir en la elección de un diseño para un sistema.
- En simulación cada variable puede sostenerse constante excepto algunas cuya influencia está siendo estudiada. Como resultado el posible efecto de descontrol de las variables en el comportamiento del sistema necesitan no ser tomados en cuenta. Como frecuentemente debe ser hecho cuando el experimento está desarrollado sobre un sistema real.
- Es posible reproducir eventos aleatorios idénticos mediante una secuencia de números aleatorios. Esto hace posible usar las técnicas de reproducción de varianza para mejorar la precisión con la cual las características del sistema pueden ser estimadas para dar un valor que refleje el esfuerzo de la simulación.

A diferencia de las ventajas mencionadas, la técnica de simulación presenta importantes desventajas, éstas son:

- Falla al producir resultados exactos. Se supone que un sistema ésta compuesto de uno o más elementos que están sujetos a un comportamiento al azar. Cuando una simulación es desarrollada con un modelo del sistema, los valores de cada variable son registrados y los promedios de estos valores son dados en una postsimulación. Pero el promedio en una muestra de observación solo a veces provee un estimado de lo esperado, es decir, una simulación solo provee estimados, no resultados exactos.
- Fallas al optimizar. La simulación es usada para contestar preguntas del tipo “¿Qué pasa si?”, pero no, “¿Qué es lo mejor?”. En este sentido, la simulación no es una técnica de optimización. La simulación no generará soluciones, solo evalúa esas que han sido propuestas.
- Largo tiempo de conducción. Un estudio de simulación no puede ser conducido o llevado a cabo en solo un fin de semana. Meses de esfuerzo pueden ser

requeridos para reunir información, construir, verificar y validar modelos, diseñar experimentos y evaluar e interpretar los resultados.

- Costos para proveer capacidad de simulación. El establecimiento y mantenimiento de capacidad de simulación, envuelve tener mejor personal, programas de cómputo, equipo, entrenamiento y otro tipo de costos.
- Abuso de simulación. Hay muchas facetas para un balanceo y comprensivo estudio de la simulación. Ya que una persona debe tener conocimiento de una gran variedad de áreas antes de llegar a ser un practicante de la simulación. Este hecho es algunas veces ignorado, sin embargo como resultado, cada estudio puede incorrectamente ser desarrollado, o podría estar incompleto, o podría caer en otro tipo de caminos, quizá resultado de una falla del esfuerzo de la simulación.

ANTECEDENTES

Respecto al uso de modelos hidrológicos existen trabajos utilizando de modelos sencillos y otros más sofisticados. Así como la de otros en los que hace la comparación entre modelos. Quede por aclarar que existe una amplia gama de trabajos enfocados a los modelos y que abordan de manera más amplia este tema. En este sentido Hargreaves y John (1985), hacen una revisión de modelos sencillos para estimar la precipitación, la evapotranspiración y el flujo de arroyos con una base limitadas de datos.

Por otro lado, de acuerdo con Belmonte y Núñez (2006), el desarrollo de modelos hidrológicos digitales en aproximaciones raster resulta una alternativa interesante para superar la escasez de datos hidrológicos y climáticos en el caso particular la región del valle de Lerma, Argentina. Ensayaron diferentes metodologías en un contexto SIG para definir, en espacios territoriales continuos, las variables: precipitación, temperatura, caudales máximos y pérdida de suelos. Los mapas generados resultan de interés para diversas aplicaciones: estudios de impacto ambiental, ordenación territorial, manejo de cuencas y recursos naturales y predicción de riesgos.

Soil and Water Assessment Tool (SWAT), es un modelo integral de cuenca desarrollado en Texas por Arnold para el Agricultural Research Service (ARS-USDA). Surge como una evolución de los programas Chemicals, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems "CREAMS" (Knisel, 1980), y el modelo Environmental Impact Policy Climate "EPIC" (Williams et al., 1984), este modelo se desarrolló modificando el modelo Simulator for Water Resources in Rural Basins "SWRRB" (Arnold y Williams, 1987), para su aplicación a cuencas grandes, complejas y rurales. SWRRB es una versión distribuida de CREAMS, la cual puede ser aplicada a una cuenca con un máximo de diez subcuencas, y SWAT es una versión ampliada y mejorada de SWRRB que corre simultáneamente en cientos de subcuencas. El modelo SWAT es un modelo hidrológico de base física semi-distribuido y continuo.

Básicamente, los submodelos (módulos) que forman parte de SWAT se pueden agrupar en climáticos, hidrológicos, de erosión, de nutrientes, agrícolas y urbanos. Estos módulos pueden ser ubicados en ocho divisiones principales: hidrología, clima, sedimentación, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, pesticidas y manejo de cultivos. Uno de los más importantes es el que calcula los escurrimientos, dado que sirve de base para los otros submodelos.

Es un modelo integral de cuenca el cual permite simular la producción de agua y sedimentos de cuencas hidrográficas.

A nivel internacional existen una multitud de ejemplos del empleo de esta herramienta. La aplicación del modelo SWAT se han llevado a cabo en Estados Unidos, Canadá, Australia, India, Italia, Alemania y Sudamérica con varios propósitos (Fohrer y Arnold, 2005; Mapfumo *et al.*, 2004; Watson, *et al.*, 2005; Gosian *et al.*, 2005; Schmidt y Volk, 2005). Recientemente se ha extendido su aplicación a países como Tanzania, Kenia, Etiopia, Ruanda, Uganda and Burundi para varias aplicaciones (Ndomba y Birhanu, 2008). Muchas de las aplicaciones han sido impulsadas por las necesidades de los diversos organismos gubernamentales, en particular en los Estados Unidos y la Unión Europea, que requieren de evaluaciones directas del cambio de cobertura vegetal y especialmente, el cambio climático sobre una amplia gama de los recursos hídricos o las evaluaciones de las capacidades de exploración del modelo para posibles aplicaciones futuras. En la red existen vínculos especializados que hacen referencia a su empleo en diversas problemáticas, uno de los cuales es el siguiente: https://www.card.iastate.edu/swat_articles/

Además de un documento que compila diversos artículos publicados a nivel internacional, Arnold *et al.*, (2009).

En el ámbito nacional, no existen muchos trabajos utilizando el modelo SWAT, o no hacen una descripción de la adaptación de este modelo, tanto en el manejo de la información de sus bases de datos y las posibles reclasificaciones de los insumos principales, como lo son el mapa de suelos y cobertura vegetal. Las cuales son base para su funcionamiento. Pero de alguna forma denotan algunas ideas a considerar para este estudio.

Torres-Benites *et al.*, (2004), aplicaron SWAT, en la cuenca "El Tejocote", localizada en Atlacomulco, Estado de México, con la finalidad de comparar los valores simulados y observados de la producción de agua, sedimentos, gastos medios y biomasa durante un período de cinco años de observación (1980-1985). Así mismo analizar su posible aplicación en cuencas que no cuenten con estaciones de aforo.

Berlanga *et al.*, (2005), realizaron un estudio a partir del procesamiento digital de imágenes Landsat y la integración de un SIG, donde evaluaron los cambios en la cobertura y usos del terreno a través de un análisis multitemporal (1973, 1986 y 2000), postclasificadorio y los impactos sobre la profundidad de escurrimientos con el modelo del número de curva en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, localizada en la costa noroeste de México.

Abad (2006), modeló el comportamiento hidrológico de las cuencas: El Chuveje y Arroyo Real, ubicadas en la Sierra Gorda de Querétaro, mediante la herramienta Automated Geospatial Watershed Assessment (AGWA), específicamente mediante el

modelo SWAT. Con apoyo del modelo identificó las áreas de mayor percolación, producción de agua, escurrimiento y producción de sedimentos, entre algunas variables de respuesta hidrológica. Analizó el efecto de diferentes cambios de cobertura del terreno en la respuesta hidrológica en términos de cantidad y calidad de agua. Además de lograr la aplicación del modelo SWAT en dos cuencas mexicanas, por medio de los resultados de la modelación, se identificaron las áreas más importantes de manejo y conservación, en términos de la respuesta hidrológica con y sin cambios de cobertura vegetal.

Para la modelación del escurrimiento en la Cuenca del Río Sextín, Trucios *et al.*, (2007) utilizaron el modelo hidrológico SWAT. Los insumos requeridos por éste fueron: Modelo Digital de Elevación (MDE), mapas de cobertura vegetal y uso del terreno (1976 y 1993) mapa de unidades edafológicas e información climatológica (precipitación, radiación, temperaturas máximas y mínimas). La calibración y validación del modelo se realizó en el 2005 en diferentes configuraciones de la cuenca, para el cálculo del escurrimiento, tomando como base de comparación el escurrimiento medido en la estación hidrométrica de Sardinias. El arreglo geométrico que mejor explicó el escurrimiento observado fue el de mayor tamaño.

Los antecedentes a nivel de la cuenca del Lago de Cuitzeo desde hace varios años tanto por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) como de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). Las investigaciones hidrológicas pioneras de la cuenca del lago de Cuitzeo, fueron realizadas por la UNAM a finales de la década de los 40's (Barbolla 1948; García, 1949), ambos trabajos iniciaron el estudio hidrológico de la cuenca.

La UMSNH, tiene más de 25 años estudiando a la cuenca del lago de Cuitzeo, principalmente en términos de caracterización biológica de los ambientes terrestres (Madrigal-Sánchez y Guridi-Gómez, 2004) y acuáticos, así como en términos de clasificación y cartografía Geológica (Pasquarè *et al.*, 1991; Israde-Alcántara y Garduño-Monroy, 1999; Israde-Alcantará *et al.*, 2002).

Algunos trabajos realizados de manera particular realizados dentro de la cuenca son se detallan a continuación:

Mendoza, *et al.*, (2004), realizaron una caracterización espacial y temporal de las estaciones meteorológicas localizadas en la cuenca de Cuitzeo y sus alrededores. El análisis de las estaciones se realizó utilizando técnicas de sobreposición cartográfica en un SIG. La distribución actual de las estaciones responde a criterios agroclimáticos y no de manejo de recursos naturales. La precipitación se incrementa desde el norte hacia el sur, mientras que la temperatura, asciende desde el sur hacia el norte. La

distribución espacial de estos parámetros indica que el área de estudio se ubica en una zona transicional, entre los climas templado seco a climas templado húmedo.

Mendoza, *et al.*, (2005), presentan una revisión de los efectos hidrológicos del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), así como las herramientas e insumos requeridos para el análisis a escala regional. El conocimiento y modelos hidrológicos generados en cuencas experimentales han sido útiles en la construcción de modelos espacialmente distribuidos. Los modelos espacialmente distribuidos permiten el modelamiento de los datos bajo un marco espacial que facilita el entendimiento de las condiciones hidrológicas de las cuencas afectadas por el CCVUS. El modelamiento hidrológico espacialmente distribuido representa una alternativa para entender la dinámica hídrica a escala regional en cuencas poco aforadas y con necesidad de evaluar la disponibilidad y distribución del agua.

López *et al.*, (2006), analizaron el cambio de cobertura y uso del terreno en la cuenca, cuyas características socio-ambientales son representativas de zonas de fuerte emigración rural en el centro de México. La evidencia más clara a nivel regional del proceso estudiado es una marcada “matorralización” de terrenos abandonados, dedicados previamente a la agricultura de secano y el crecimiento de los asentamientos urbanos. Los resultados se asocian a procesos de “desmantelamiento” de territorios con la consiguiente pérdida de comunidades, localidades y sus paisajes.

Carlón-Allende y Mendoza (2007), realizaron un análisis de datos hidrometeorológicos, con el objetivo de analizar el comportamiento de las series de tiempo de los datos de precipitación, temperatura y escurrimiento de las estaciones ubicadas en las subcuencas de Cointzio, Queréndaro y San Marcos, localizadas dentro de la cuenca. Este análisis de tendencia indica que la temperatura media en la estación de Morelia tiende a aumentar de manera significativa tanto en sus valores mensuales como en el valor medio anual; mientras que en Cuitzeo y Huingo tienden a reducir sus temperaturas en forma significativa. Para las precipitaciones anuales indica que las estaciones de Huingo y Jesús del Monte han presentado un aumento estadísticamente significativo.

Mendoza *et al.*, (2010), presentan un estudio de las implicaciones del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo (CCVUS), a nivel regional en el balance hídrico espacialmente distribuido (BHED), para 1975 y 2000. El análisis del cambio de los componentes del BHED a nivel de formas de relieve y por matrices de transición determinó que durante el periodo de estudio las condiciones hidrológicas regionales de la cuenca no se modificaron sustancialmente. Sin embargo, en ambos años, las formas de relieve de las zonas bajas de la cuenca mostraron fuerte presión sobre el recurso

hídrico, lo cual repercute en el deterioro del lago de Cuitzeo, principalmente por contaminación y reducción del suministro de agua superficial al vaso.

JUSTIFICACIÓN

En México, la medición de la cantidad y calidad del agua no es realizada de manera homogénea o periódica y directa a través de estaciones de monitoreo hidrométrico y de calidad de agua, respectivamente. Ante esta circunstancia, un modelo para simulación hidrológica, al brindar la posibilidad de reproducir los componentes del ciclo hidrológico con la ayuda de un sistema computacional, se convierte en un banco de pruebas que le permite al investigador simular condiciones futuras, que afectarían a uno o varios de los procesos físicos que intervienen en dicho ciclo. La implantación de obras de captación, corrección de cauces, la urbanización, el cambio del uso del terreno, entre otros, son hechos que afectan directamente el movimiento y la producción del agua en una cuenca hidrográfica. Además sería otra contribución encaminada hacia la planificación y manejo de la cuenca, especialmente en términos hídricos.

El problema de trabajar a escala de cuencas lo representa la manipulación de grandes volúmenes de datos, su análisis y la posterior toma de decisiones.

La necesidad de disponer de más agua para aumentar las cosechas o para atender las crecientes demandas urbanas para uso doméstico, condición que ha originado una presión aún mayor sobre los recursos hídricos, casi siempre escasos. Paralelamente el cambio climático tendrá tarde o temprano su impacto sobre el agua afectando no sólo a la agricultura sino también a las poblaciones rurales y urbanas en los distintos usos que éstas demandan (agua potable, producción de energía, usos recreativos, entre otros).

La cuenca del Lago de Cuitzeo es una unidad natural en la que se han dado importantes cambios de cambio de cobertura y de uso del terreno en las últimas décadas.

El efecto del cambio de la cobertura vegetal y uso del terreno (CCVUT), representado por la expansión de las áreas agrícolas y pecuarias, ha tenido una profunda influencia en los procesos hidrológicos en pequeñas cuencas y a nivel regional (Sahagian, 2000).

El manejo de cuencas proporciona el marco conceptual, espacial e integral que permite el manejo ecosistémico de recursos naturales, incluyendo el recurso hídrico, el cual minimiza los efectos del CCVUT (Carlón *et al.*, 2006). Actualmente, este marco conceptual es la mejor opción para el manejo y conservación de recursos naturales (Ersten, 1999; Jain *et al.*, 2000).

OBJETIVOS

Objetivo general

- Ajustar la aplicación del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) a las condiciones existentes en una cuenca templada semi-rural en Mexico y simular escenarios

Objetivos particulares

- Adaptar los insumos requeridos por el modelo hidrológico SWAT para su aplicación a la Cuenca del Lago de Cuirzeo
- Describir las ventajas y limitaciones de la aplicación del modelo SWAT para simular la escorrentía en el caso particular de la cuenca del Lago de Cuizeo
- Ejemplificar la variación de la escorrentía en la Cuenca del Lago de Cuitzeo por medio de la simulación hidrológica con ArcSWAT, utilizando datos para cinco años entre 1975 y 2008.
- Describir posibles escenarios en función de los cambios en la cobertura vegetal y uso del terreno en la cuenca.

HIPÓTESIS

La línea del presente trabajo es el modelamiento hidrológico enfocado a la simulación de posibles escenarios de escurrimiento influenciados por factores climáticos, diferentes tipos de cobertura vegetal y uso del terreno, que pueden producir efectos negativos o positivos en los flujos y almacenamientos del agua en la cuenca del lago de Cuitzeo. Por lo tanto el planteamiento de la posible hipótesis estaría en función de los diferentes escenarios simulados.

En lo que respecta al modelo la hipótesis haría hincapié en su gran uso a nivel global y por tanto representaría un ejercicio sencillo de ajuste para el caso de cuencas templadas, como el caso de la cuenca de Cuitzeo, donde además se cuenta con gran cantidad de información.

Aunque sería posible establecer hipótesis para cada uno de los periodos en función de la proporción de coberturas y por tanto definir mayor o menor escurrimiento.

Capítulo II

Descripción del área de estudio

La cuenca del lago de Cuitzeo se localiza en el Sistema Volcánico Transmexicano entre los estados de Michoacán y Guanajuato, entre los 19° 30' y 20° 05' latitud norte y 100° 35' y 101° 30' longitud oeste (Figura 1), tiene una superficie de aproximadamente 4 000 km², por lo cual la podríamos denominar como una cuenca grande.

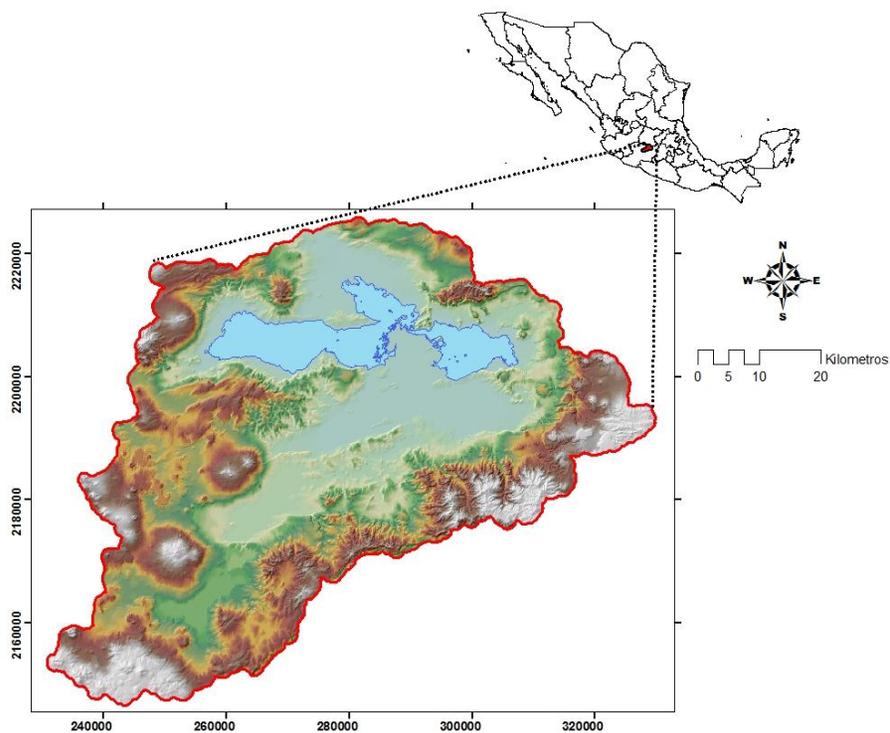


Figura 1. Ubicación de la zona de estudio.

Es una cuenca endorreica lacustre, en el Cuadro 1 se denotan algunas otras características de la forma de la cuenca.

La forma, interviene principalmente en la manera como se presenta el volumen de agua escurrido a la salida de la cuenca. Generalmente los volúmenes escurridos en cuencas alargadas son más uniformes a lo largo del tiempo, en cambio, en cuencas compactas el agua tarda menos en llegar a la salida, en donde se concentra en un tiempo relativamente corto.

Cuadro 1. Datos morfométricos para la Cuenca del lago de Cuitzeo

Rasgos morfométricos		
Coefficiente de forma	$K_f=0.66$	Moderadamente achatada
Coefficiente de compacidad	$K_c=1.68$	De oval oblonga a rectangular oblonga

De acuerdo con los análisis morfométricos, indican que la cuenca es de baja amplitud de relieve que va de los 1830 hasta los 3420 msnm y que el 90% de esta se encuentra por debajo de los 2500 msnm, en la Figura 2 y 3 se muestran dos perfiles de la cuenca, donde se pueden apreciar en cierto grado el relieve que lo forma. El 90% de la superficie posee una pendiente por debajo de los 25°, por lo que la mayor extensión tiene una densidad de disección horizontal de nula a moderada, lo que tiene importantes implicaciones en el proceso de erosión, ya que en consecuencia no existe suficiente material para ser depositado en las porciones bajas de la misma (Mendoza *et al.*, 2001, Mendoza, 2002).

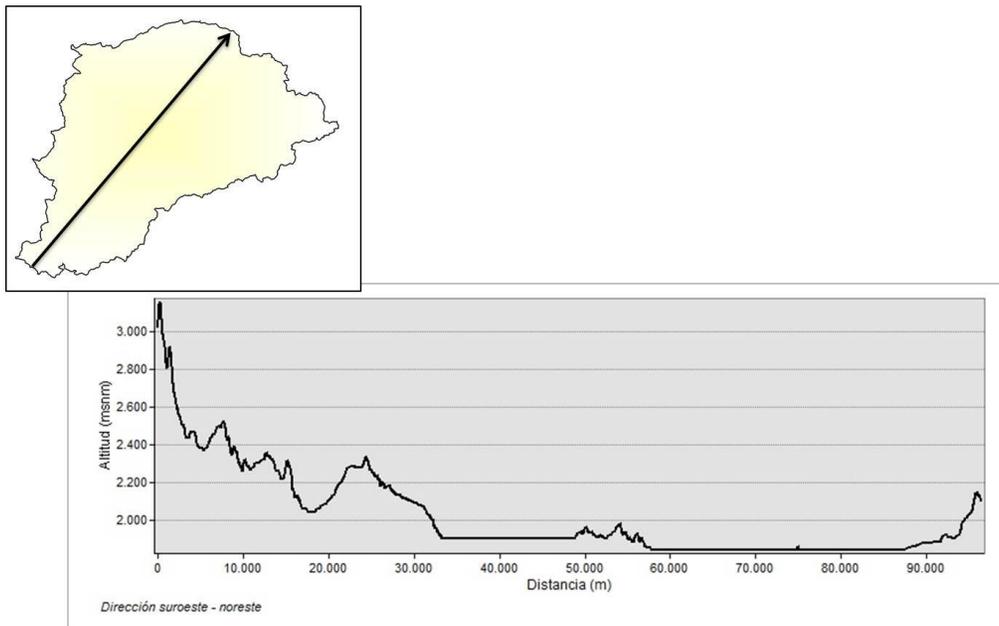


Figura 2. Perfil de la cuenca del lago de Cuitzeo

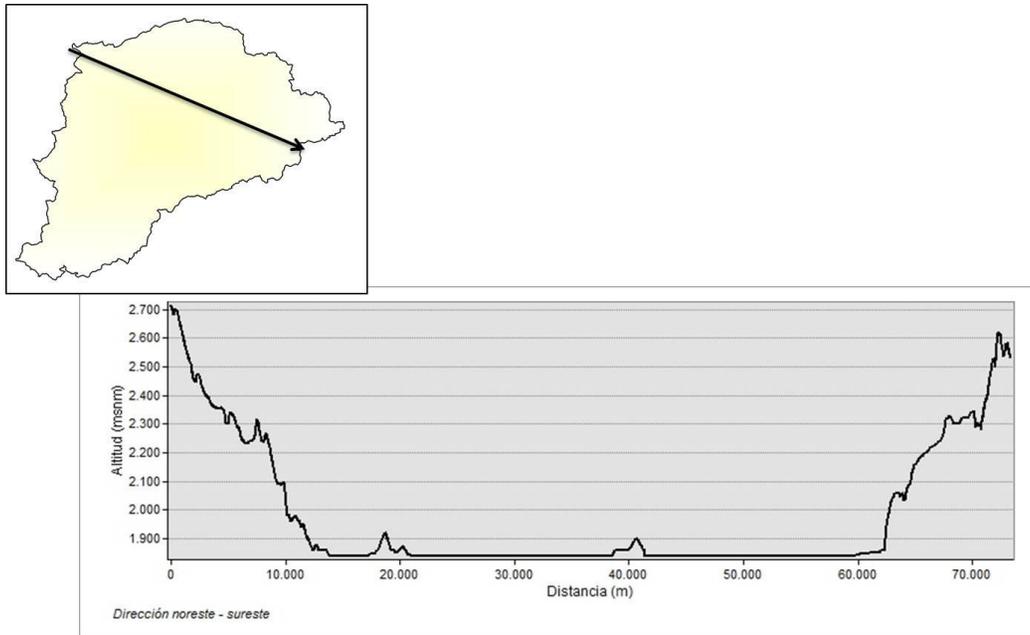


Figura 3. Perfil 2 de la cuenca del lago de Cuitzeo

Basado en dominios morfoestructurales la cuenca se encuentra relacionada a tres regiones fisiográficas (Garduño, 2005), el Dominio del Complejo Volcánico Interior, Dominio del Cinturón Volcánico Mexicano y Dominio de Cuenas Lacustres.

El dominio lacustre de la cuenca del Lago de Cuitzeo cuyo origen es endorreico, se localiza sobre un sustrato de tipo volcánico (Israde, 1995).

En la cuenca se encuentran rocas de origen ígneo extrusivo como los derrames de lava, escorias, aglomerados, tobas y flujos de tobas soldadas de composición ácida y básica procedentes del Mioceno inferior hasta el reciente, también existen rocas de origen sedimentario continental, formadas por sedimentos lacustres (arenas, gravas y conglomerados), intercalados con tobas riolíticas, que a su vez son cubiertos por basaltos del Plioceno superior. Cabe destacar, que los depósitos más recientes están constituidos por limos y arcillas de origen lacustre, gravas y arenas de tipo residual y aluviones entre los que se encuentran gravas, arenas y limos (Israde, 2005 y Ortega, 2003).

De acuerdo con Mendoza (2002), describe que la cuenca está conformada por zonas geomorfológicas mayores: montañas, lomeríos altos, lomeríos bajos, colinas, piedemontes y planicies, es decir, es una cuenca relativamente plana y con poca amplitud de relieve, la cual se desarrolla sobre materiales volcánicos de composición intermedia a básica del Mioceno al Cuaternario.



Figura 4. Representación de un lomerío alto cubierto por bosque mixto en la parte norte de la cuenca, en los límites de los Estados de Michoacán y Guanajuato

Esta cuenca a su vez está dividida en 51 subcuencas, siendo la de Río Grande la de mayor superficie 37,090 hectáreas, en comparación con la de Buenavista con la menor superficie 410 hectáreas (Figura 5 y Cuadro 2).

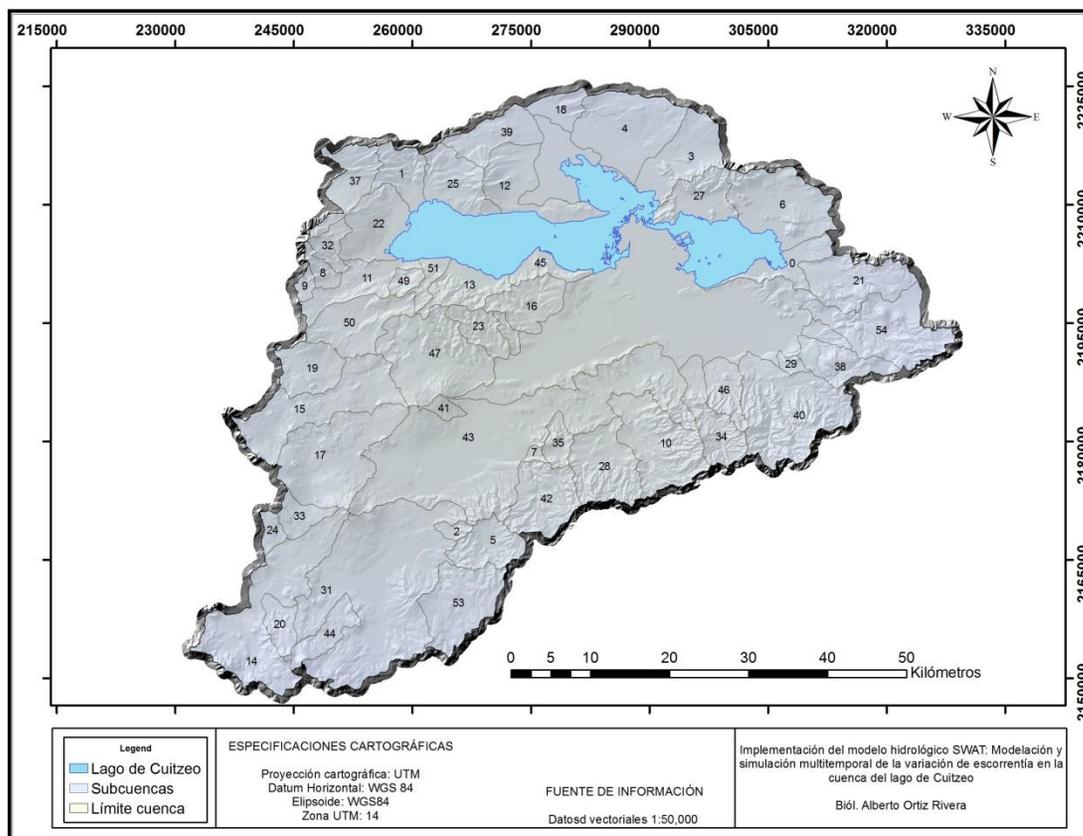


Figura 5. División de la Cuenca de Cuitzeo en subcuencas

Cuadro 2. Nombre de la subcuenca y el área que ocupan

Nombre subcuenca	Área Ha	ID	Nombre subcuenca	Área Ha	ID	Nombre subcuenca	Área Ha	ID
Araró	3445	0	El Derramadero	2359	18	Ojos de agua	4214	38
Arroyo Blanco	3742	1	El Fresnito	4641	19	Pichicuario	4749	39
Arroyo Colorado	785	2	El Pedregal	2336	20	Queréndaro	13443	40
Arroyo el Moral	6758	3	El Rocío	6922	21	Quinceo	938	41
Arroyo el Timbinales	10529	4	El Sauz	6031	22	Río Chiquito	6605	42
Atécuaro	4373	5	El Tlacuache	2935	23	Río Grande	37090	43
Bordo Prieto	9761	6	Fontezuelas	1168	24	San Andrés	3122	44
Buenavista	410	7	Huandacareo	5511	25	San Juan Tarárameo	2158	45
Bueyadero	1337	8	Irámucó	4797	27	San Lucas Pío	3288	46
Cápula	13089	9	Jaripeo	7278	28	San Marcos	12353	47
Cerro Pelón	748	10	La Estancia	679	29	San Pedro Bogan	1112	48
Charo	9507	11	Lagunillas	30333	31	San Sebastián	1139	49
Chucándiro	4662	12	Las Cruces	1889	32	Santa Inés	6692	50
Chupícuario	6825	13	Las Pilas	2259	33	Santa Rita	1502	51
Copándaro	4237	14	Los Naranjos	5217	34	Umécuaro	8018	53
Cuanajo	15216	15	Los Pirules	1838	35	Zinapecuaro	10218	54
Cuto de la Esperanza	11063	16	Mesón Nuevo	836	36			
Cuto del Porvenir	4742	17	Nicolás Tumbastiro	4635	37			

El patrón de drenaje en la porción elevada de la cuenca es drendrítico a subdendrítico, la mayor densidad de escurrimientos se localiza hacia la porción elevada del sur de la cuenca; los escurrimientos en la porción norte son escasos, con un patrón poco desarrollado. En el sector centro-oriental, con vulcanismo reciente también presenta un patrón poco desarrollado. La mayoría de los conos volcánicos y domos presentan un patrón de drenaje radial centrípeto. En la porción plana de la cuenca el patrón de drenaje se encuentra fuertemente alterado por la actividad agrícola de riego, la cual se ubica principalmente en la porción sur del lago. El principal escurrimiento de la cuenca es el Río Grande de Morelia, el cual escurre de suroeste a noreste, pero al llegar a la planicie de riego éste se rectifica y se convierte en un canal de riego. El lago recibe agua de tres ríos principales, el Grande de Morelia, el Queréndaro y Zinapécuaro. El lago cuenta además con las aportaciones de numerosos arroyos de temporal y cuerpos temporales que se localizan en la parte baja de la cuenca. Las zonas de mayor infiltración y recarga se encuentran en la parte poniente de Capula y Cuto de la Esperanza, Irapeo y la zona de Mil Cumbres (Bravo-Espinosa *et al.*, 2008). En la Figura 6 se representa la hidrografía de la cuenca.

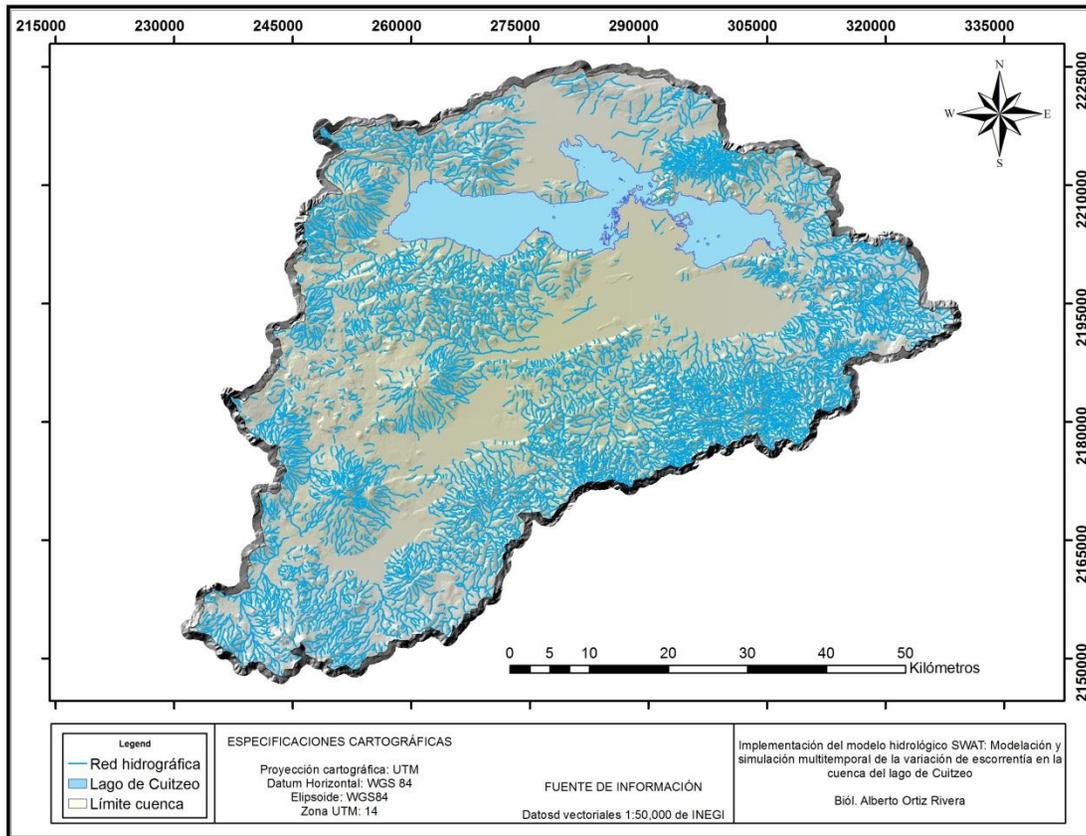


Figura 6. Hidrografía de la cuenca del lago de Cuitzeo

De acuerdo a la cartografía de aguas superficiales del INEGI, presente en Mendoza *et al.*, (2001), el 76% de la cuenca tiene un coeficiente de escurrimiento de 10 a 20%, mientras que el 71% de la cuenca presenta posibilidades bajas de almacenamiento de agua subterránea.

Los tipos climáticos al interior de la cuenca de acuerdo con la clasificación de García (2004), abarcan tres, el clima predominante corresponde al templado con lluvias en verano “Cb”, secos “BS” y semicálidos “A(C)” con distintas variaciones en los subtipos climáticos debido a las condiciones que determinan lo accidentado del terreno y a la variación altitudinal. De acuerdo con Mendoza (2002), la precipitación anual promedio calculada es de 847.4 mm y la temperatura media anual oscila entre 16-18°C para casi toda el área, con excepción de las tierras altas en donde se presentan temperaturas de 14-16°C (Robles, 2006). En la figura 7 se muestra un panorama espacial de las estaciones meteorológicas que dentro de la cuenca o cercanas a ella.

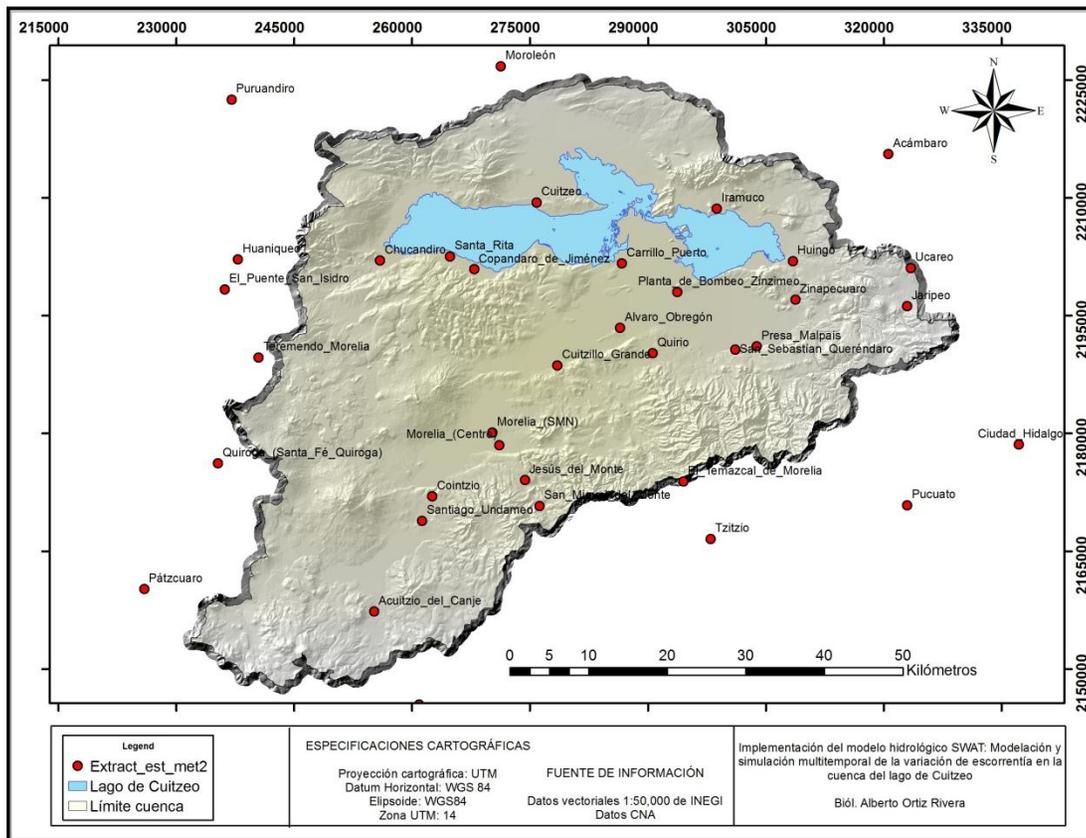


Figura 7. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la cuenca del lago de Cuitzeo

En la cuenca se ubican parcial o totalmente 28 municipios (Figura 8, Tabla 3), de los cuales 23 corresponden al estado de Michoacán y cinco al estado de Guanajuato. Dentro de la cuenca se localizan 15 cabeceras municipales: Acuitzio del Canje, Álvaro Obregón, Copándaro de Galeana, Cuitzeo del Porvenir, Charo, Chucándiro, Huandacareo, Huiramba, Indaparapeo, Lagunillas, Queréndaro, Santa Ana Maya, Tarímbaro, Zinapécuaro y Morelia. Los municipios con mayor población son Morelia, Zinapécuaro, Tarímbaro y Cuitzeo en donde se encuentran ubicadas las ciudades con mayor población de la cuenca, incluyendo la ciudad de Morelia, el asentamiento más importante en términos demográficos y económicos.

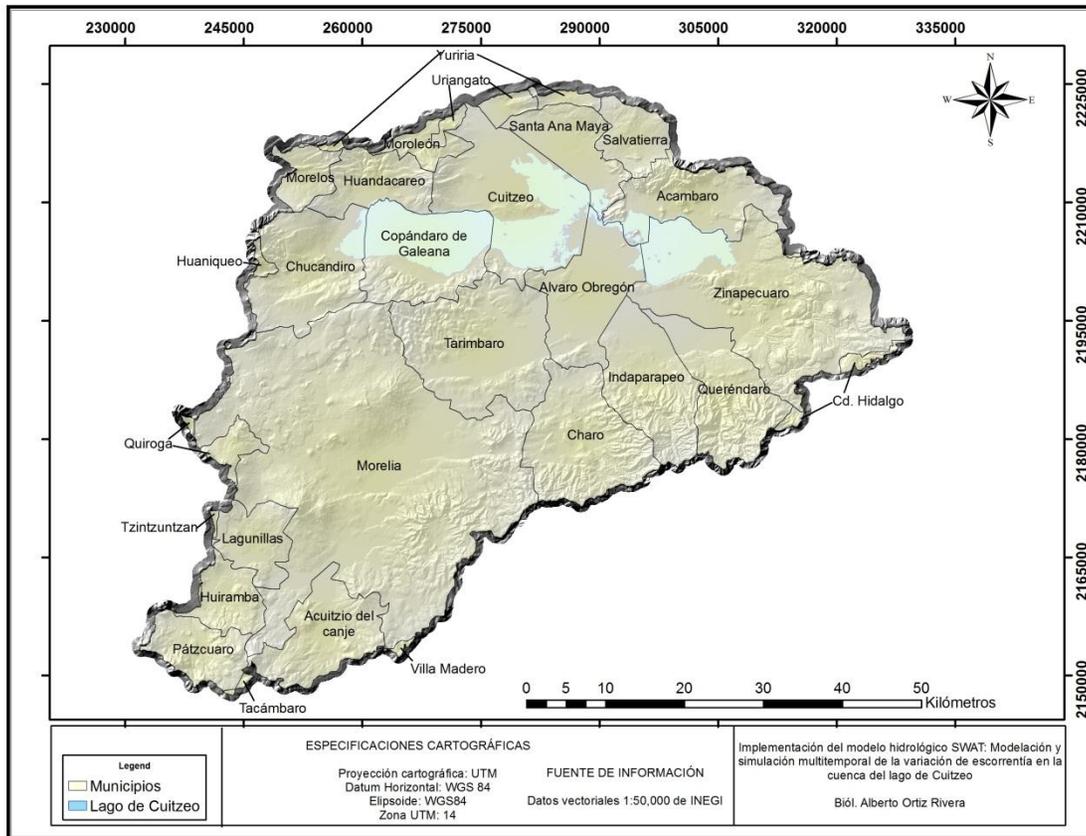


Figura 8. Municipios que forman parte de la cuenca del lago de Cuitzeo

Cuadro 3. Municipios que integran la cuenca del lago de Cuitzeo

Nombre Municipio	Estado	Área (Km ²)
Morelia	Michoacán	1057.5
Zinapécuaro	Michoacán	428.4
Tarimbaro	Michoacán	262.4
Cuitzeo	Michoacán	255.9
Charo	Michoacán	200.1
Chucandiro	Michoacán	183.2
Copándaro de Galeana	Michoacán	175.5
Indaparapeo	Michoacán	167.8
Queréndaro	Michoacán	159.2
Alvaro Obregón	Michoacán	156.9
Acambaro	Guanajuato	146.3
Acuitzio del canje	Michoacán	140.5
Santa Ana Maya	Michoacán	103.7
Huandacareo	Michoacán	90.8

Nombre Municipio	Estado	Área (Km ²)
Pátzcuaro	Michoacán	83.5
Lagunillas	Michoacán	78.3
Huiramba	Michoacán	65.3
Salvatierra	Guanajuato	64.2
Morelos	Michoacán	45.3
Moroleón	Guanajuato	32.1
Uriangato	Guanajuato	29.5
Quiroga	Michoacán	29.4
Yuriria	Guanajuato	17.5
Cd. Hidalgo	Michoacán	16.3
Huaniqueo	Michoacán	7.4
Villa Madero	Michoacán	3.0
Tzintzuntzan	Michoacán	2.6
Tacámbaro	Michoacán	0.8

En la cuenca se encuentran once grupos de suelo (Cuadro 4 y Figura 9), de acuerdo con la clasificación FAO 1990. En la mayor parte de la cuenca se desarrollan principalmente Vertisoles, Luvisoles, Andosoles y Acrisoles, es decir, básicamente son suelos constituidos por materiales con texturas predominantemente finas a medias (Mendoza *et al.*, 2001, Pulido *et al.*, 2001). En la planicie de la cuenca predominan los suelos arcillosos los cuales se encharcan y dificultan las labores de labranza cuando están secos o muy húmedos. Estos suelos se utilizan para la agricultura de temporal y de riego. Los suelos menos arcillosos se localizan en la parte sur, estos tienen vocación forestal, sin embargo, han sido utilizados para la agricultura de temporal, lo cual ha favorecido su erosión.

Cuadro 4. Grupos de Suelo de la cuenca, su extensión y porcentaje para la cuenca del lago de Cuitzeo

Grupos FAO	Área km²	% en la cuenca
<i>ACRISOLES</i>	411.53	10.29
<i>ANDOSOLE</i> S	461.82	11.54
<i>CAMBISOLES</i>	16.8	0.42
<i>GLEYSOLE</i> S	25.42	0.64
<i>LITOSOLE</i> S	194.63	4.87
<i>LUVISOLE</i> S	693.9	17.35
<i>PHAEOZEM</i> S	401.19	10.03
<i>PLANOSOLE</i> S	34.93	0.87
<i>REGOSOLE</i> S	1.37	0.03
<i>SOLONCHAK</i> S	85.85	2.15
<i>VERTISOLE</i> S	1354.43	33.86

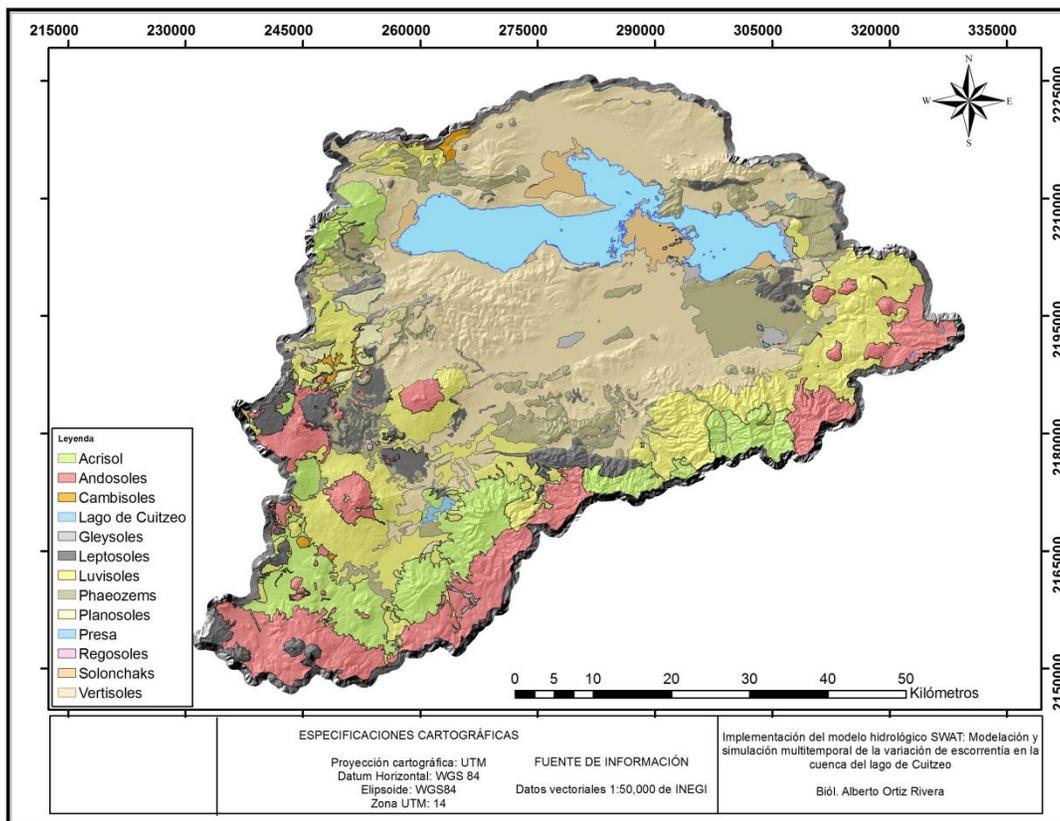


Figura 9. Unidades de suelo para la cuenca de Cuitzeo, de acuerdo a FAO, 1990

Pulido *et al.*, (2001), mencionan que los suelos de la cuenca tienen un grado alto de deterioro, este dividido al interior y de forma superficial (Figura 10). Mientras que para Mendoza *et al.*, (2001), la mayor parte de los suelos muestran evidencia de erosión y los Vertisoles en algunas zonas cercanas al vaso de la cuenca tienen un alto grado de ensalitramiento, lo cual se asocia principalmente con un mal manejo del agua y al uso de agroquímicos.



Figura 10. Problemática de erosión presente en algunas zonas de la cuenca. Este problema afecta menos de 2% de la superficie total de la cuenca

La clasificación de la cobertura y uso del terreno fue realizada para los años de 1975 y 2000 por López y Bocco (2001), basado en fotografías aéreas. La cartografía de la cobertura vegetal y uso del terreno fue realizada bajo criterios de clasificación fisonómica-estructural, donde cada categoría es una unidad mixta dominada por el elemento que le proporciona su nombre (López y Bocco, 2001).

Los principales tipos de vegetación presentes en la cuenca son bosques templados, matorrales, selva baja caducifolia y vegetación acuática y subacuática.



Figura 11. Vista de algunos bosques y laderas inclinadas en diferentes puntos de la cuenca, desde bosques mixtos en la foto superior en los límites del Estado del Michoacán, pequeños manchones de bosque de juníperos en la foto inferior izquierda y del lado derecho otro bosque mixto estos dentro de la subcuenca de Queréndaro

Los bosques (Figura 11), que se encuentran en la cuenca son de coníferas (pino, oyamel y cedro blanco), también se encuentran representados los bosques de encino, conformando comunidades mixtas con especies de pinos (bosques mixtos). Además podemos encontrar pequeños manchones de bosque mesófilo de montaña, principalmente ubicados en cañadas donde las condiciones microclimáticas favorecen su establecimiento (Leal-Nares, 2009).



Figura 12. Matorrales subtropicales que se encuentran dentro de la cuenca, este tipo de cobertura vegetal y representativa de la parte centro y norte de la cuenca

Los matorrales (Figura 12), con base en los criterios establecidos por López y Bocco (2001), estos corresponden al matorral subtropical, el bosque tropical caducifolio y los matorrales secundarios derivados de la perturbación de ecosistemas templados (Robles, 2006).



Figura 13. Pastizales ocupados por actividad pecuaria, en la zona central de la cuenca

Los pastizales son una comunidad que está formada por gramíneas de baja estatura, se localizan en pequeñas extensiones debido a que gran parte corresponden a asociaciones secundarias (Leal-Nares, 2009). La gran mayoría de estas comunidades de pastos (Figura 13), están relacionadas con la remoción de la cubierta vegetal original, ocasionada por actividades antropogénicas (Carranza, 2005, Robles, 2006).



Figura 14. Imagen de una zona inundable al norte de la cuenca

La vegetación acuática tiene una distribución restringida a los cuerpos de agua (Figura 14), los tipos más frecuentes son el tular y el carrizal. Debido a la poca profundidad del lago de Cuitzeo y el gran número de manantiales se desarrolló este tipo de vegetación (Leal-Nares, 2009). En la Figura 15 y 16 se muestra el mapa de cobertura y uso del terreno para el año 1975 y 2008.

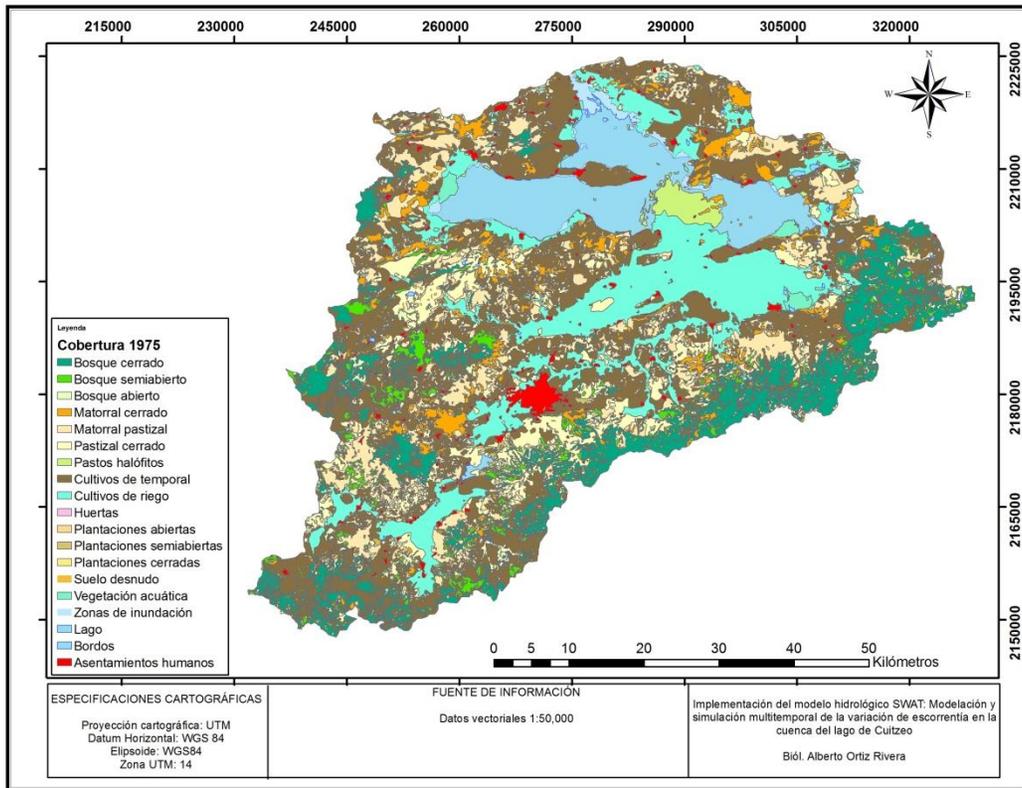


Figura 15. Tipos de cobertura y uso del terreno para la cuenca del lago de Cuitzeo 1975

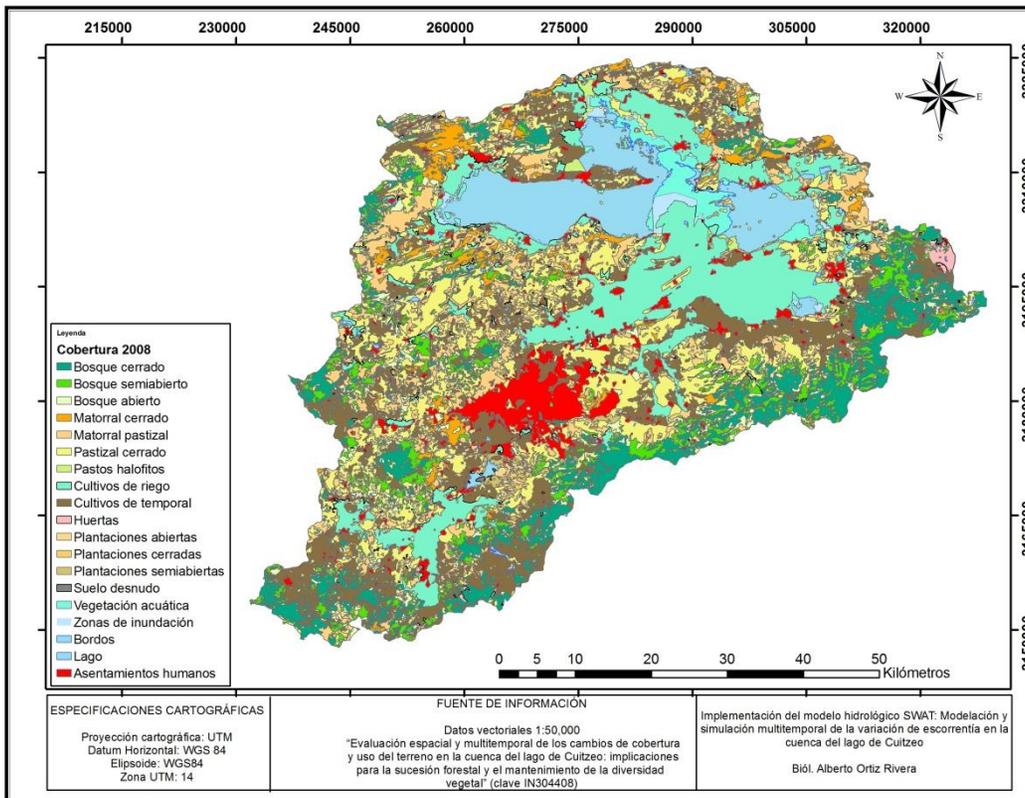


Figura 16. Tipos de cobertura y uso del terreno para la cuenca del lago de Cuitzeo 2008

Dentro de la cuenca se cuenta con una región terrestre prioritaria para la conservación no. 111 (cerro Ancho-lago de Cuitzeo) por la Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad. Se considera una región importante para la conservación porque está catalogado como el remanente más importante del bosque tropical caducifolio que en otros tiempos ocupaba cerca de 11,000 km² y que ahora ha desaparecido casi totalmente. Es una región terrestre prioritaria (RTP) que comprende en su mayoría al lago de Cuitzeo; al norte se encuentra el cerro Ancho que se encuentra cercano al lago de Cuitzeo. La vegetación predominante es de matorral subtropical en el cerro Ancho y domina la agricultura de temporal y de riego así como la vegetación acuática (Arriaga *et al.*, 2000).

Por otro lado también se contemplan las denominadas áreas naturales protegidas, ubicadas en tres categorías que abarcan un área de 1,370 Ha:

1. “Las tinajas de Huandacareo” en el municipio de Huandacareo
2. “Manantial la Mintzita” y su zona de amortiguamiento con carácter de zona sujeta a preservación ecológica, en el municipio de Morelia
3. “Ex escuela agrícola denominada La Huerta” en el municipio de Morelia
4. “Cerro Punhuato” en el municipio de Morelia
5. “Loma de Santa María y depresiones aledañas de la ciudad de Morelia” en el municipio de Morelia
6. “Instituto Tecnológico Agropecuario No. 7” en el municipio de Tarímbaro
7. “Fideicomiso de la Ciudad Industrial de Morelia” en el municipio de Morelia
8. “Francisco Zarco” en el municipio d Morelia

Entre las principales actividades que han provocado el deterioro de los recursos naturales de la cuenca están el cambio de uso del terreno, que ha favorecido en alguna medida la erosión y consecuentemente el transporte de contaminantes aguas abajo y el abatimiento del manto freático (Mendoza, 2001; Galindo, 2005; Soto-Galera, 1999; Mendoza *et al.*, 2010), las cuales han agravado la eutrofización del lago y una disminución en los niveles del vaso. Otro de los factores que han intensificado la problemática ambiental es el crecimiento de la población y la expansión de los asentamientos humanos hacia los terrenos agrícolas, los bosques y matorrales, ya que esto conlleva una mayor presión sobre los ecosistemas (López *et al.*, 2006).

Materiales y métodos

Para el desarrollo de esta investigación se contó con datos espacialmente distribuidos y datos puntuales.

Datos espaciales

- Bases de datos cartográficas de cobertura vegetal y uso del terreno por periodo de cambio que abarcan de 1975, 1986, 1996, 2000, 2003 y 2008 (López *et al.*, 2006, Mendoza *et al.*, 2008; Mendoza *et al.*, sometido)
- Conjunto de datos topográficos vectoriales a escala 1:50,000 (INEGI, 1999)
- Conjunto de datos tipos de suelos vectoriales a escala 1:50,000 (INEGI, 2000)

Datos puntuales

- Datos precipitación diaria, así como temperatura máxima y mínima de las 16 estaciones meteorológicas de la cuenca.
- Datos de suelos de 164 pozos levantados por el INEGI, 10 perfiles por el Centro de Investigaciones de Geografía Ambiental con diferentes finalidades y 13 perfiles en trabajo de campo.
- Datos de análisis de suelos elaborados por el INEGI, datos del Centro de Investigaciones de Geografía Ambiental y trabajo de campo de este estudio.

Proyección

Una indicación pertinente, es que los conjuntos de datos espaciales para ArcSWAT se pueden crear en cualquier proyección (la misma proyección se debe utilizar para todos los capas de información antes de cualquier proceso). Para este caso en particular la proyección de todas las capas de información está dada en UTM Zona 14 y el datum WGS84.

Descripción del modelo SWAT

SWAT (SOIL AND WATER ASSESMENT TOOLS)

El modelo hidrológico SWAT utiliza la interfaz ArcSWAT para ArcGIS 9.1, 9.2 y 9.3.

El modelo SWAT

El modelo que se aplica en esta tesis es el SWAT, implementado dentro de ARCGIS, este modelo está basado en un **Balance Hídrico** para determinar la entrada salida y almacenamiento de agua en la cuenca, este balance se calcula con la siguiente ecuación:

$$SW_t = sw + \sum (R_i - Q_i - ET_i - P_i - QR_i)$$

Donde:

SW_t es el contenido de agua en el suelo en el día t

Sw es el agua aprovechable por las plantas o el contenido de agua en le suelo a 0.1-bar menos el contenido de agua a 15-bar

t es el tiempo en días

R es la precipitación diaria

Q la cantidad de escorrentía diaria

Et la evapotranspiración diaria

P la percolación diaria

QR el flujo de retorno o flujo base

*Todas las unidades en mm.

Escorrentía o escurrimiento superficial. Es la porción de la lluvia que fluye sobre el suelo en zonas de ladera o de pendiente. La escorrentía se origina de dos formas: por las lluvias de baja intensidad y larga duración que saturan el suelo y en consecuencia, el agua al no poder penetrar en el suelo (infiltrarse) fluye por la superficie pendiente a bajo por el camino de menor resistencia; o por las lluvias de alta intensidad que sobrepasan la capacidad de infiltración del suelo y por ende se desliza superficialmente el agua de exceso (Morgan, 1986). Estos flujos superficiales transportan hasta los canales de drenaje, naturales o no, los sedimentos que han sido desprendidos por el impacto directo de las gotas de lluvia sobre el suelo y los que este flujo puede desprender de la capa superficial del suelo.

La cantidad de escurrimiento (Q) es estimada por medio de la metodología de la curva numérica establecida por el servicio de Conservación de Suelos de los EEUU (SCS), con datos de lluvia diarios (USDA-SCS, 1972). Q es el escurrimiento diario, que está determinado por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice. Para ello, usa las tres condiciones de humedad con la finalidad de proporcionar estimaciones más realistas del número de la curva.

$$Q = (R - 0.2 s)^2 / (R + 0.8s) \quad R \geq 0.2s$$

$$Q = 0.0 \quad R \leq 0.2 s$$

Donde:

Q es el escurrimiento diario

R la lluvia diaria

S es el parámetro de retención, este parámetro está relacionado con la curva numérica (CN) (USDA-SCS, 1972).

$$S = 254 ((100/CN)-1)$$

La constante 254 en la ecuación transforma S en mm. Así, R y Q también son expresados en mm. SWAT hace correcciones para CN basada en el pendiente, debido a que esta descrito para 7% de pendiente.

El modelo SWAT también simula el escurrimiento máximo, a través del método racional modificado, el cual se usa ampliamente en el diseño de drenajes, canales y sistemas para el control de avenidas, y está basado en el supuesto de que si una lluvia de intensidad i comienza en el tiempo $t = 0$ y continúa indefinidamente, la cantidad del escurrimiento se incrementará hasta el tiempo de concentración, $t = t_{conc}$, cuando el área de la cuenca entera contribuye al flujo de salida. La fórmula racional modificada se expresa como:

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot \text{Área}}{3.6 \cdot t_{conc}}$$

Donde q_{peak} es la tasa promedio de escurrimiento máximo ($m^3 s^{-1}$); α_{tc} es la fracción de la lluvia que ocurre durante el tiempo de concentración; Q_{surf} es el escurrimiento superficial (mm H_2O); Área es el área de la cuenca (km^2); t_{conc} es el tiempo de concentración de la cuenca (h); 3.6 es un factor de conversión de unidades.

Infiltración. De acuerdo con Chow (1994), la infiltración es un proceso en el que el agua penetra desde la superficie del suelo. Algunos de los factores que intervienen y afectan este fenómeno son la cobertura vegetal, la porosidad y la conductividad hidráulica así como el contenido de humedad en el suelo, de ahí su importancia en el balance hídrico, ya que la infiltración se puede considerar de esta forma como una de las pérdidas en dicho balance.

Flujo lateral. Es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos y alimenta las canales de drenaje, quebradas y ríos. El flujo subsuperficial es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0 - 2 m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control:

$$(S_2 - S_1) / (t_2 - t_1) = I * L - ((q_{lat1} + q_{lat2}) / 2)$$

Donde:

S es el volumen drenable de agua almacenada en la zona de saturación en m/m (mayor capacidad de campo)

t es el tiempo en horas

q_{lat} es el flujo lateral en m^3/h

L es la longitud de la pendiente de la cuesta en m y los sufijos 1 y 2 se refieren al comienzo y final del intervalo.

Percolación. El agua de percolación es la fracción del agua infiltrada que logra atravesar la zona radical de raíces, la cual SWAT considera entre 0 y 2 m. Esta agua de percolación puede llegar hasta los canales de drenaje (flujo de retorno) o percolarse hasta los acuíferos profundos a más de 25m.

El componente percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento combinado para predecir el flujo medio de cada capa de suelo. Una vez que el agua es percolada al acuífero profundo, esta no puede alimentar el escurrimiento. La técnica de almacenamiento está basada en la siguiente ecuación:

$$SW_i = SW_0 \exp(-\Delta t / T T_i) \quad T T_i = (SW_i - FC_i) / H_i$$

Donde

SW_0 y SW son los componentes del agua del suelo en el comienzo y final de día en mm

Δt es el intervalo de tiempo en (24h)

TT_i es el tiempo de viaje a través de la capa del suelo i en h

H_i es la conductividad hidráulica mm/h

F_{ci} es el contenido de agua a capacidad de campo para cada capa, en mm .

Así la percolación puede ser calculada por sustitución de SW desde SW_o .

$$O_i = SW_o * (1 - \exp(-\Delta t / TT_i))$$

Donde

O_i es la tasa de percolación en mm/d .

Flujo de retorno. Es el agua que llega hasta el cauce de los canales naturales desde las aguas subterráneas, este flujo es el que mantiene agua en los ríos y quebradas en las épocas de baja precipitación

$$\Delta t \nabla \Delta t + R_c * (1 - e \nabla q_i = q_i - 1 * e$$

es la constante de ∇ donde q_i es el flujo de retorno en el día i , proporcionalidad, R_c es la recarga del acuífero superficial. Esta ecuación está sustentada en que la variación del flujo de retorno con el tiempo está también relacionada linealmente con la recarga del acuífero.

Evapotranspiración. La evapotranspiración es el agua que sale del suelo hacia la atmósfera por transpiración de las plantas y por evaporación del agua del suelo. El modelo SWAT ofrece tres métodos para estimación de la Evapotranspiración potencial: Penman-Monteith (1965), Hargreaves-Sammani (1985) y Priestley-Taylor (1972).

Estos tres métodos varían en la cantidad de los insumos necesarios. El método de Penman-Monteith requiere radiación solar, temperatura del aire, humedad relativa y velocidad del viento. El método de Priestley-Taylor requiere radiación solar, temperatura del aire y la humedad relativa. El método de Hargreaves requiere una, temperatura del aire.

Se decidió emplear el método Hargreaves, debido a que es el más sencillo y requiere de menor número de insumos. Este método fue derivado originalmente de ocho años de datos de lisímetro en California (Hargreaves, 1975). Varias mejoras se hicieron a la ecuación original (Hargreaves y Samani, 1982 y 1985) y la forma utilizada en SWAT fue publicado en 1985 (Hargreaves et al., 1985).

$$\lambda E_0 = 0.0023 * H_0 * (T_{mx} - T_{mn})^{0.5} * (\bar{T}_{av} + 17.8)$$

Donde λ es el calor latente de vaporización (MJ kg^{-1}), E_0 es la evapotranspiración potencial (mm d^{-1}), H_0 es la radiación extraterrestre ($\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$), T_{mx} es la temperatura máxima del aire para un día ($^{\circ}\text{C}$), T_{mn} es la temperatura mínima del aire para un día ($^{\circ}\text{C}$), y \bar{T}_{av} es la temperatura por día ($^{\circ}\text{C}$).

Variables Climáticas. Las variables climáticas para el SWAT son precipitación, temperatura del aire, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Si la precipitación y la temperatura diaria están disponibles, pueden entonces ser ingresadas directamente al modelo.

La precipitación es el mecanismo por el cual el agua entra en la fase terrestre del ciclo hidrológico. Debido a la precipitación controla el balance hídrico, es fundamental que la cantidad y distribución de la precipitación en el espacio y el tiempo sea exactamente simulada por el modelo.

SWAT incluye el generador de clima denominado WXGEN, para generar datos climáticos o para llenar los vacíos en los registros medidos. El WXGEN es ampliamente complementado y mejorado hasta la versión actual denominado ArcSWAT descrito por Winchell *et al.*, (2009).

El generador de clima WXGEN, usa una cadena de Markov de primer orden para definir si un día es lluvioso o seco. Con el modelo de cadena de Markov, la probabilidad de tener lluvia en cierto día es condicionada a la situación de que el día anterior sea húmedo o seco.

Para cada periodo de tiempo se asigna un único valor para la Precipitación, Temperatura mínima y Temperatura máxima a cada subcuenca. Este valor único se toma de la estación más cercana (distancia mínima al centro de gravedad "centroide" de cada subcuenca).

Sedimentación. Los sólidos perdidos o sedimentos son el suelo que se pierde por acción de la erosión hídrica, el suelo es desprendido por el golpe directo de las gotas de lluvia y por la fricción del agua de escorrentía. El suelo desprendido es transportado por los flujos superficiales hasta los canales de drenaje, por los cuales es sacado de la cuenca o depositados en el cauce.

La producción de sedimentos es calculada para cada unidad (HRU) de respuesta hidrológica con la ecuación modificada de la pérdida universal de suelo (MUSLE). (Williams *et al.*, 1977).

$$Y = 11.8 (V*qp) 0.56K*C*PE*LS$$

Donde

Y es la producción de sedimentos desde la subcuenca en t

V es el volumen de escurrimiento superficial para la subcuenca en m³

qp es la tasa de flujo pico en m³/s

K es el factor de erodabilidad del suelo

C es el factor de manejo

PE es el factor de la práctica de control de erosión, y LS es el factor de la práctica del control de la erosión. (Arnold *et al.*, 2001).

El método que se utilizó en esta investigación se representa en la Figura 17.

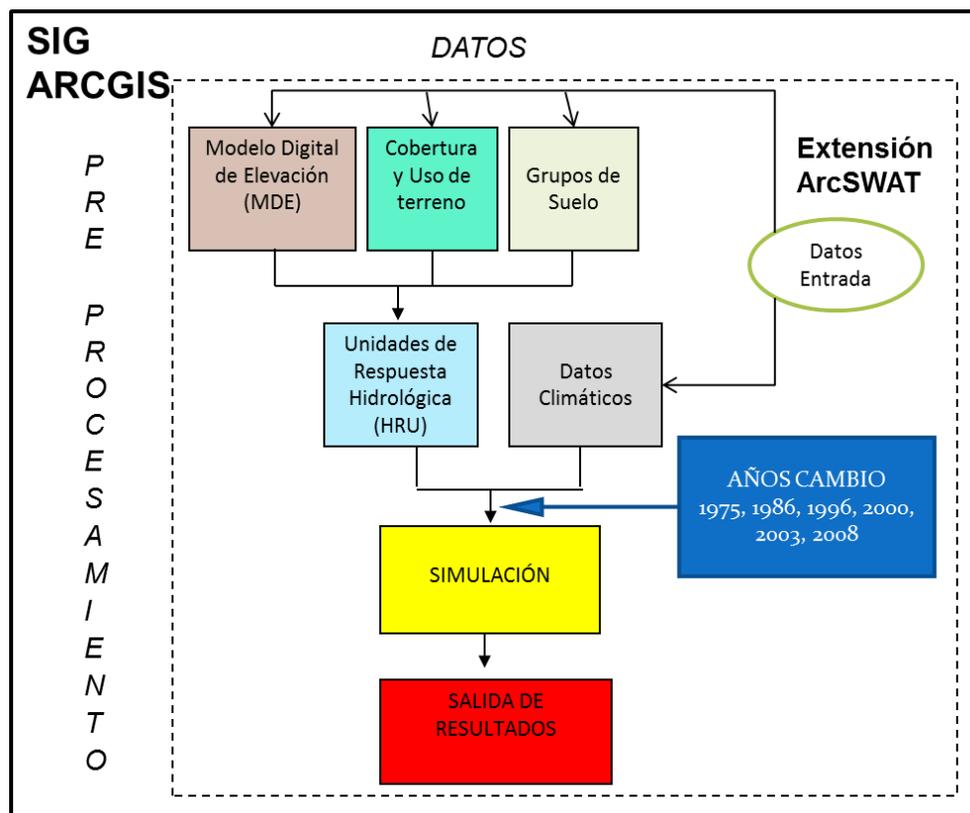


Figura 17. Método general empleado en esta investigación

Pre procesamiento e Ingreso de datos

Los datos mínimos necesarios se detallan a continuación:

- Topografía (curvas de nivel, ríos, entre otros)
- Grupos de Suelo
- Cobertura vegetal y uso del terreno
- Series de datos en un periodo mínimo de 10 años, principalmente temperatura mínima, máxima y precipitación

Generación del Modelo Digital de Elevación (MDE)

Un elemento base es la generación de MDE (Figura 18), con un tamaño de celda de 30 m, a partir de curvas de nivel del mapa vectorial de topografía digital de INEGI (1:50,000). Cabe aclarar que existen diversas formas de generar este insumo y gran diversidad de programas de cómputo que lo realiza, la diferencia radica en el algoritmo que emplean así como la resolución con la que se requiera este insumo. Se utilizaron métodos estándar por medio de la herramienta 3d Analyst para la generación del MDE, a partir de los contornos de las cotas altitudinales primeramente se generó un modelo TIN (Red de Triángulos Irregulares, además considerado como un híbrido entre los datos raster y los datos vectoriales), de manera general el tamaño de estos triángulos está en función de la rugosidad del terreno, es decir, triángulos grandes son válidos en zonas planas o de pendientes suaves, mientras que los triángulos pequeños se debieran a terrenos muy accidentados, esta característica hace al modelo TIN sea más preciso y eficiente, sin embargo por cuestiones técnicas es ideal tener este insumo en formato raster (requerido por SWAT), por lo tanto, se realizó la conversión de formato con la misma herramienta, para este formato los valores de altitud se almacenan en una malla o grid regular. Esta estructura permite algoritmos sencillos para modelar pendientes, orientaciones, entre otros insumos derivados de esta información.

La interfaz permite al MDE utilizar enteros o números reales para los valores de elevación. Las unidades utilizadas para definir la resolución de la cuadrícula y la elevación no están obligados a ser idénticos. Por ejemplo, la resolución de la cuadrícula puede estar en metros, mientras que la elevación puede estar en los pies. La resolución de la cuadrícula se debe definir en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas, grados decimales La elevación

se debe definir en una de las siguientes unidades: metros, centímetros, yardas, pies, pulgadas.

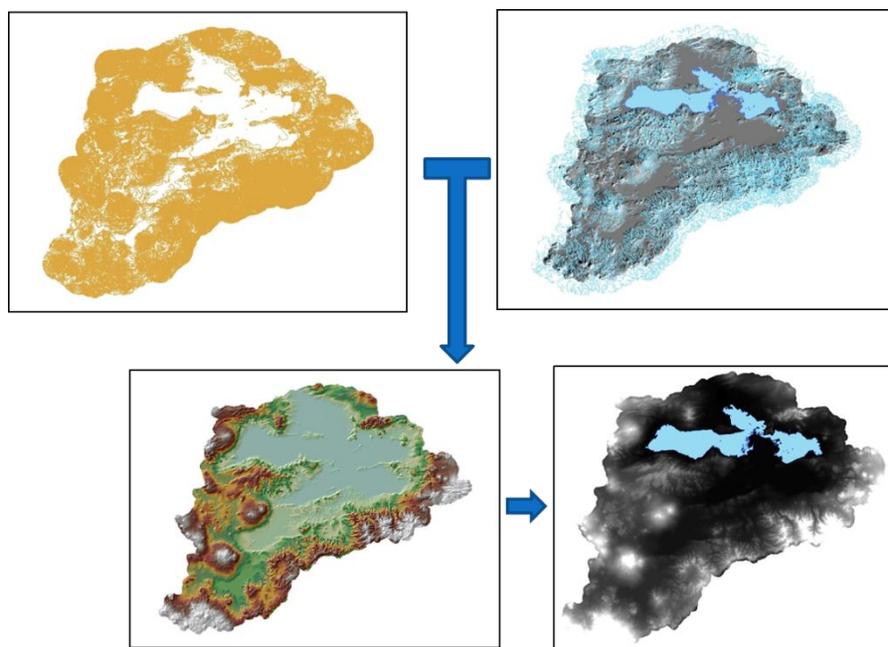


Figura 18. Vista del proceso de generación del MDE

Suelos

Para el presente estudio de acuerdo con la carta de suelos del INEGI, se tienen suelos pertenecientes a once grupos, con sus correspondientes subgrupos.

Cabe aclarar que a pesar de tener información con más detalle de las unidades de suelo y sus respectivas subunidades, no se contaban con los datos requeridos por el modelo para cada subunidad y utilizar las mismas propiedades de la unidad principal hubiera conllevado a la generalización. Por tanto se decidió emplear sólo los grupos de suelo sin tomar en cuenta los subgrupos, además que la gran mayoría conserva el valor del grupo hidrológico del suelo (Anexo 2), un parámetro muy importante (Cuadro 5). Lo que aporta este subunidad son propiedades de mayor detalle. Tal vez, en un estudio a nivel de subcuenca tendría más sentido realizar el esfuerzo que conlleva la obtención de estos datos.

Cuadro 5. Unidades de suelo dominante y su grupo hidrológico propuesto

Suelos WRB	GRUPO HIDROLÓGICO DE SUELO
<i>ACRISOLES</i>	C
<i>ANDOSOLES</i>	C
<i>CAMBISOLES</i>	C
<i>GLEYSOLES</i>	D
<i>LEPTOSOLES</i>	A
<i>LUVISOLES</i>	C
<i>PHAEOZEMS</i>	B
<i>PLANOSOLES</i>	B
<i>REGOSOLES</i>	A
<i>SOLONCHAKS</i>	C
<i>VERTISOLES</i>	D

Las categorías especificadas en el mapa de suelos deberán estar vinculados a la base de datos del suelo (sólo datos de suelos para Estados Unidos), incluido en la interfaz o bien se puede utilizar la base de datos del usuario. Para reclasificar las categorías del mapa, la información puede ser introducida manualmente dentro de la interfaz, que fue la única opción viable en nuestro caso. Esta fue recabada de varias fuentes, como se mencionó, datos puntuales (datos INEGI y trabajo de campo, Figura 19), referencias bibliográficas, artículos y especialistas. En algunas ocasiones para algunos grupos de suelos la información no era solo un valor, sino intervalos o un conjunto de datos, donde se decidió tomar valores medios de las propiedades que se encontraran en esta situación.

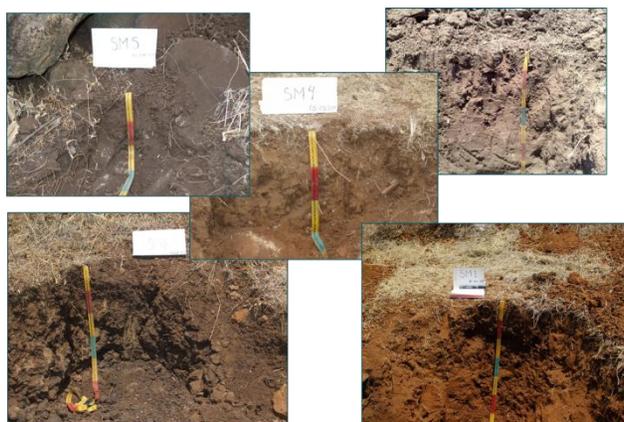


Figura 19. Diferentes perfiles de suelo realizados durante el trabajo de campo, estos complementaron la base de datos de INEGI, todos estos realizados en la subcuenca de San Marcos

La información vectorial de esta capa se información se procesó y concentro en los grupos de suelo dominante. Y como último proceso la rasterización con resolución de 30 x 30 m.

Cobertura Vegetal y Uso del Suelo

En el caso de la cobertura vegetal y de usos de suelo, el mapa generado tiene 19 categorías para los cinco periodos, que se encuentran diferenciadas por sus características físicas, las mismas que definen el comportamiento del agua receptada en la precipitación.

Las categorías especificadas en la cobertura del terreno/mapa de usos del terreno tendrá que ser reclasificado por lo tipología de SWAT relacionada con la base de datos de cubierta terrestre/tipos de plantas. De las 19 categorías iniciales se generalizó a 13 clases. Y su posterior rasterización con resolución de 30 x 30 metros (Figura 20 y Cuadro 6).

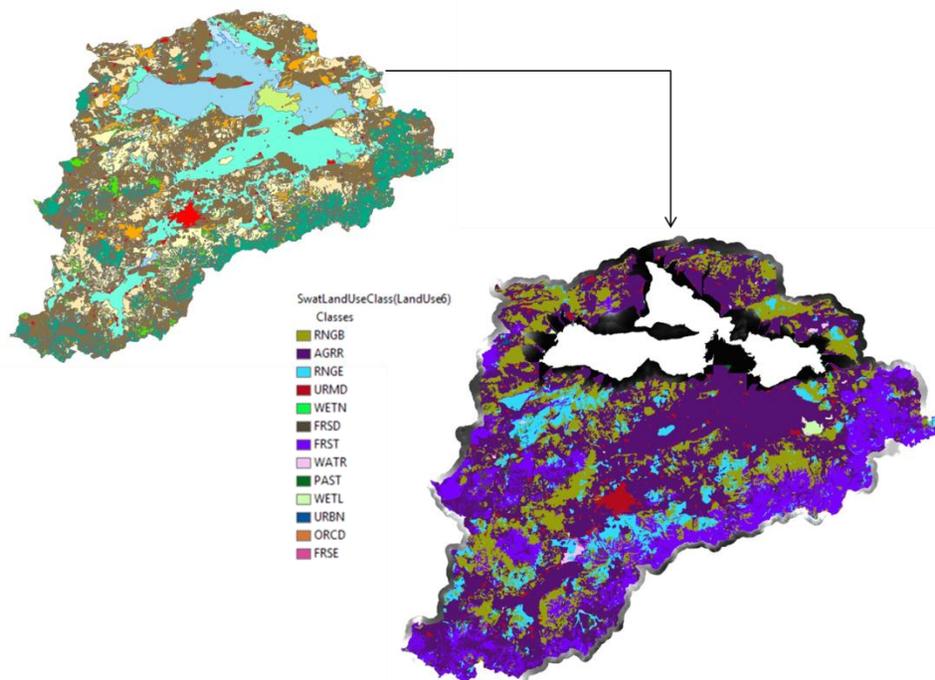


Figura 20. Reclasificación de la cobertura y uso del terreno bajo la interfaz de ArcSWAT

Cuadro 6. Reclasificación y generalización a las clases SWAT de las capas de cobertura y uso del terreno

CLASES COBERTURA	RECLASIFICACIÓN ARCSWAT	CLAVE SWAT
ASENTAMIENTOS HUMANOS	URBAN RESIDENTIAL MEDIUM DENSITY	URMD
BORDOS	WATER	WATR
BOSQUE ABIERTO	FOREST DECIDUOUS	OAK
BOSQUE CERRADO	FOREST MIXED	FRST
BOSQUE SEMIABIERTO	FOREST MIXED	FRST
CULTIVOS TEMPORALES	AGRICULTURAL LAND-ROW CROPS	AGR
CULTIVOS DE RIEGO	AGRICULTURAL LAND-ROW CROPS	AGR
HUERTAS	ORCHARD	ORCD
LAGO	WATER	WATR
MATORRAL CERRADO	RANGE BRUSH	RNGB
MATORRAL PASTIZAL	RANGE BRUSH	RNGB
PASTIZAL CERRADO	RANGE GRASSES	RNGE
PASTOS HALÓFILOS	PASTURE	PAST
PLANTACIONES DE ARBOLES ABIERTAS	FOREST DECIDUOUS	FRSD
PLANTACIONES DE ARBOLES CERRADAS	FOREST EVERGREEN	FRSE
PLANTACIONES DE ARBOLES SEMIABIERTOS	FOREST MIXED	FRST
SUELO DESNUDO	RESIDENTIAL	URBN
VEGETACIÓN ACUÁTICA	WETLANDS-MIXED	WETL
ZONAS DE INUNDACIÓN DEL LAGO	WETLANDS-NON-FORESTED	WETN

Información Climática

Los datos climatológicos son especialmente importantes. Por un lado se define la localización y cota altitudinal de las estaciones, por otro los valores registrados de precipitación media diaria y temperaturas extremas diarias, principalmente, aunque también cabe la posibilidad de introducir valores de radiación y velocidad del viento medias diarias. Estas últimas sólo son necesarias según el modelo de evaporación utilizado. Todas las series de precipitación y temperatura disponibles fueron tratadas para rellenar los huecos y extenderlas consistentemente hasta tratar disponer de series lo más completas en el espacio y en el tiempo. En el caso de aun continuar con falta de información, se hizo uso del simulador climático, el cual genera estocásticamente los valores de precipitación y temperatura más probables, para ser usados en caso de no contar con información completa. La calidad de las series obtenidas mediante otros métodos, por ejemplo los geoestadísticos en otros trabajos es muy superior a las generadas por SWAT. Las estaciones meteorológicas que se usaron para la modelación se muestran en la Tabla 9 y su representación espacial en Figura 21.

Cuadro 7. Estaciones meteorológicas empleadas en este estudio

Estación Meteorológica	Clave	X	Y	Altitud	Años
Acuitzio del Canje	16001	255181	2157303	2087	44
Álvaro Obregón	16004	286490	2193429	1834	21
Carrillo Puerto	16016	286696	2201645	1841	36
Chucandiro	16034	255912	2202005	1851	18
Cointzio	16022	262558	2171964	2035	65
Copándaro de Jiménez	16155	267911	2200909	1851	31
Cuitzeo	16027	275880	2209423	1849	82
Cuitzillo Grande	16028	278506	2188642	1856	35
Huingo	16052	308460	2201933	1861	63
Iramuco	11027	298814	2208620	1846	10
Jaripeo	16514	323023	2196199	2538	15
Jesús del Monte	16055	274372	2174054	2150	69
Morelia (SMN)	16081	270243	2180092	1928	39
Planta de Bombeo Zinzimeo	16091	293774	2197985	1837	38
Presa Malpais	16096	303858	2191061	1892	41
Quirio	16105	290613	2190197	1851	41

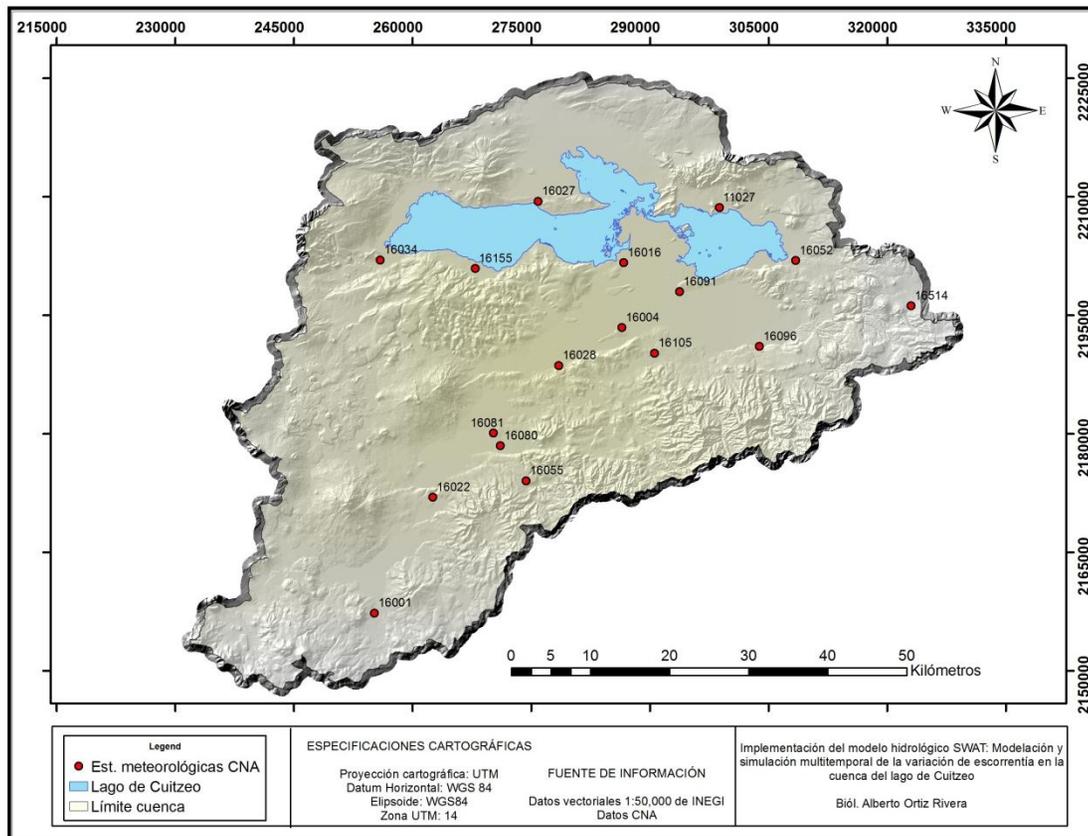


Figura 21. Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en este estudio

Tanto para el caso de la temperatura mínima, máxima y de la precipitación diaria, se decidió utilizar los datos históricos entre 1 de Enero de 1970 al 31 de diciembre del 2008, para las estaciones que así lo permitieran o el año más reciente.

Generación de las subcuencas

La cuenca es fraccionada en varias subcuencas a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y exactitud del estudio, dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada y están relacionadas con las vecinas. Está basada en el número de puntos definidos por el usuario en el menú de entrada de delineación. Cada límite de subcuenca marca el final de un alcance, el punto final del cual es el punto de acumulación de todos los datos de flujo de aguas arriba que se incorporan después en la subcuenca río abajo (Figura 22).

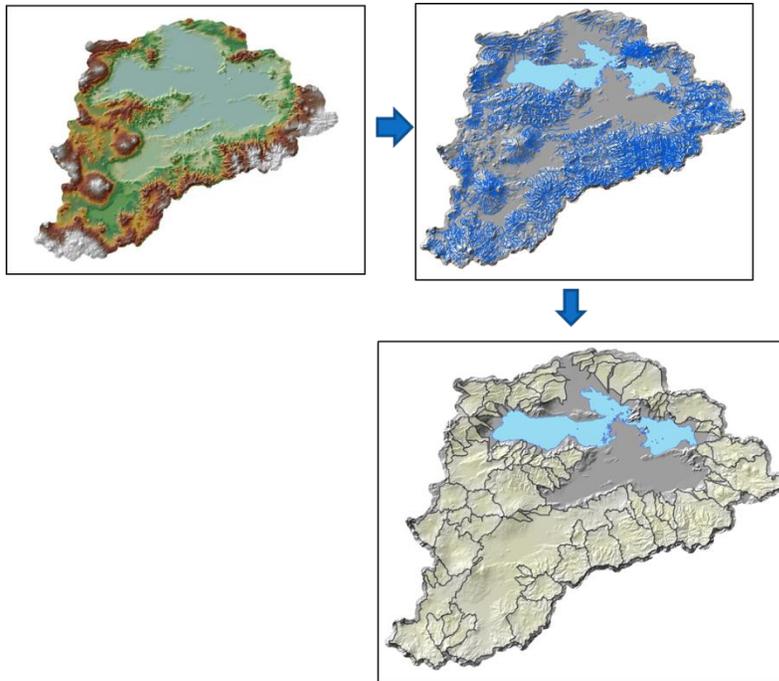


Figura 22. Ejemplificación gráfica de la generación semiautomatizada por ArcSWAT.

Generación de las Unidades de Respuesta Hidrológica

Las subcuencas se dividen en Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU en inglés) que conforman una combinación única de tipos de suelo, usos del terreno y cobertura, pendiente, de forma que cada subcuenca posee al menos una HRU. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para varios tipos de suelos y coberturas. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital de elevación para obtener el total en la cuenca. Esto aporta una mayor precisión en la descripción física del balance de agua.

Capítulo III

Resultados

Uno de los productos de generados por el modelo y uno de los principales insumo para los procesos realizados, es el delineado de subcuencas, aunque en este caso particular se trató de semejar a la delimitación previa de subcuencas. Por este proceso y después de depurar los trazos dentro de la planicie lacustre, por este método se proponen 73 subcuencas (Figura 23).

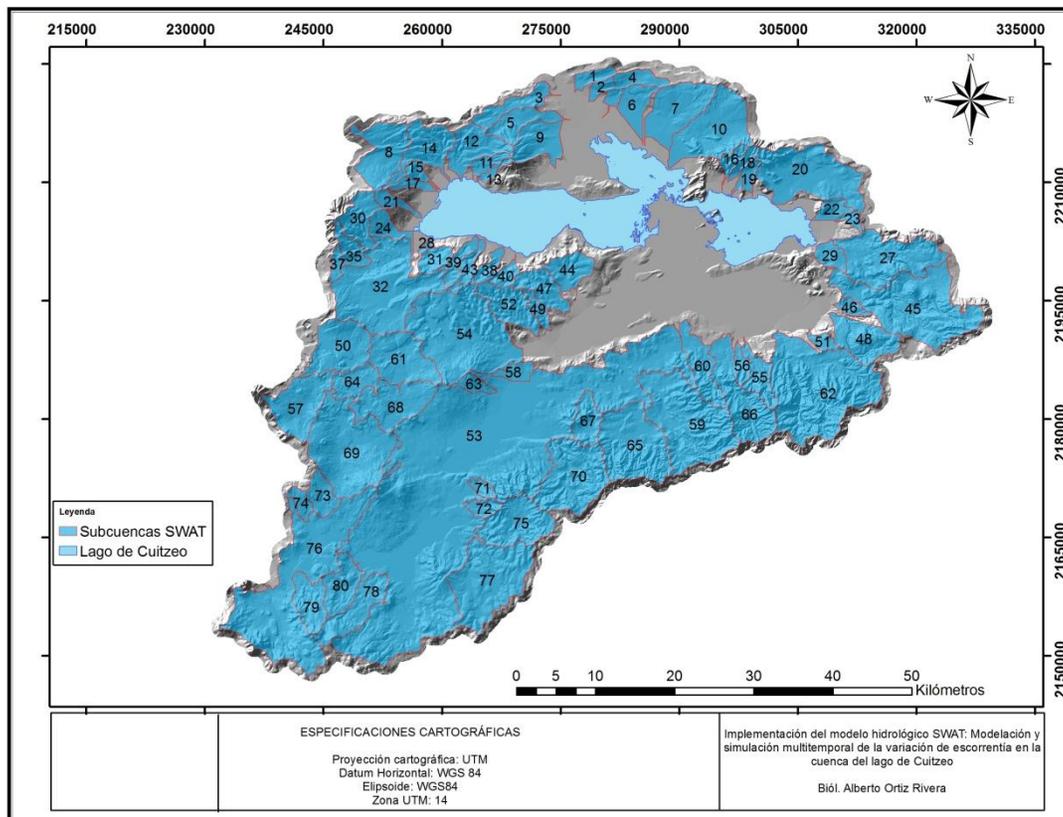


Figura 23. Delimitación de subcuencas por la extensión ArcSWAT

Otro insumos base para todos los calculos y procesos del SWAT es espacializar la información puntual de los datos climáticos. A continuación se muestra en la Figura 25 esta distribución y generalización de esta información. Cada color indica la influencia de una estación meteorológica en las subcuencas y asocia la información de precipitación y temperatura a cada una, formando agrupaciones de las subcuencas, es decir, estas subcuencas tienen los mismo valores climaticos durante la simulación.

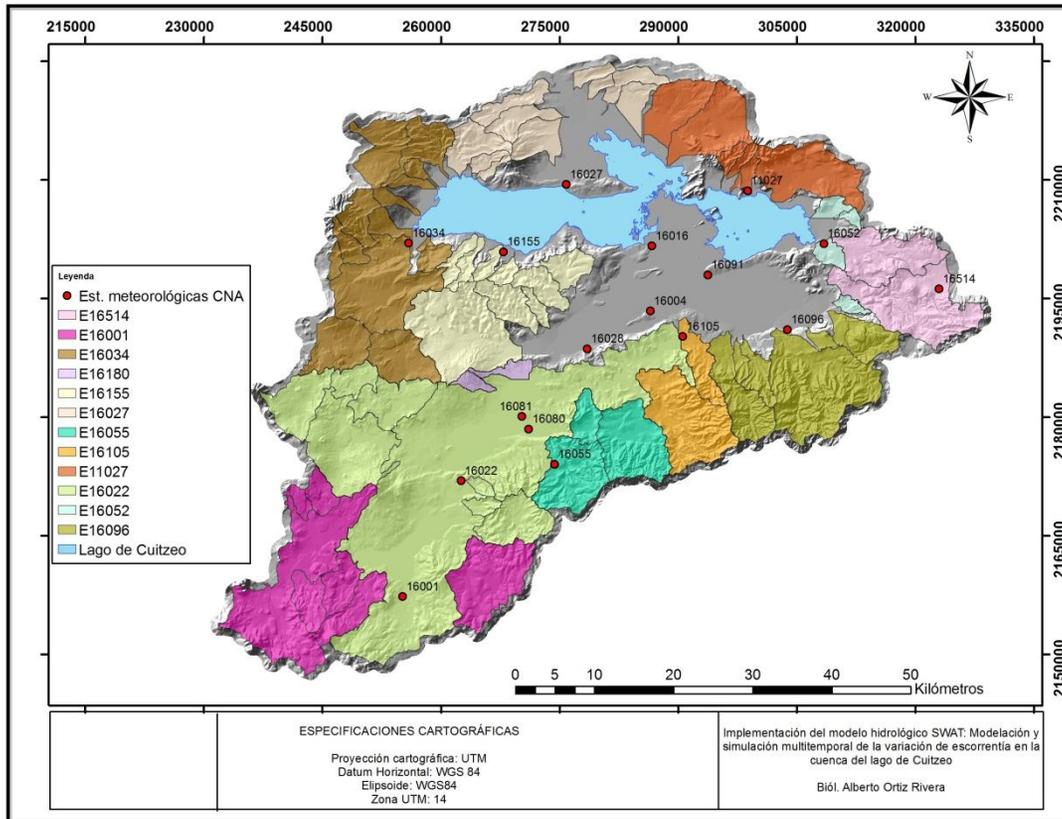


Figura 24. Mapa de distribución de la precipitación y temperatura realizada por la extensión ArcSWAT

De acuerdo con la simulación realizada con el modelo SWAT, se muestran los siguientes resultados, cabe especificar que estarán divididos en resultados globales, es decir, para toda la cuenca y por otro lado a nivel de las subcuencas generadas por el modelo.

Si tenemos en cuenta los datos de porcentajes de la cobertura y el uso del terreno (Figura 27, Cuadro 9), para explicar el comportamiento tanto de recarga total (Q_s), así como el de evapotranspiración real (Evt), y no solo tomar en cuenta la precipitación. Para 1996 donde el valor de escurrimiento y precipitación son los menores para las simulaciones, el valor de Q_s y Evt no comparten esta tendencia, el valor mínimo de Q_s se da para el año de 1986, donde la cobertura no indica una tendencia para este comportamiento y esto podría responder con las propiedades del suelo, por otro lado para la Evt el valor mínimo es para el año 2003, donde algo que puede tener relación es que en este año la cobertura de los bosque cerrados es el que tiene mayor porcentaje, esto puede estar favoreciendo este proceso.

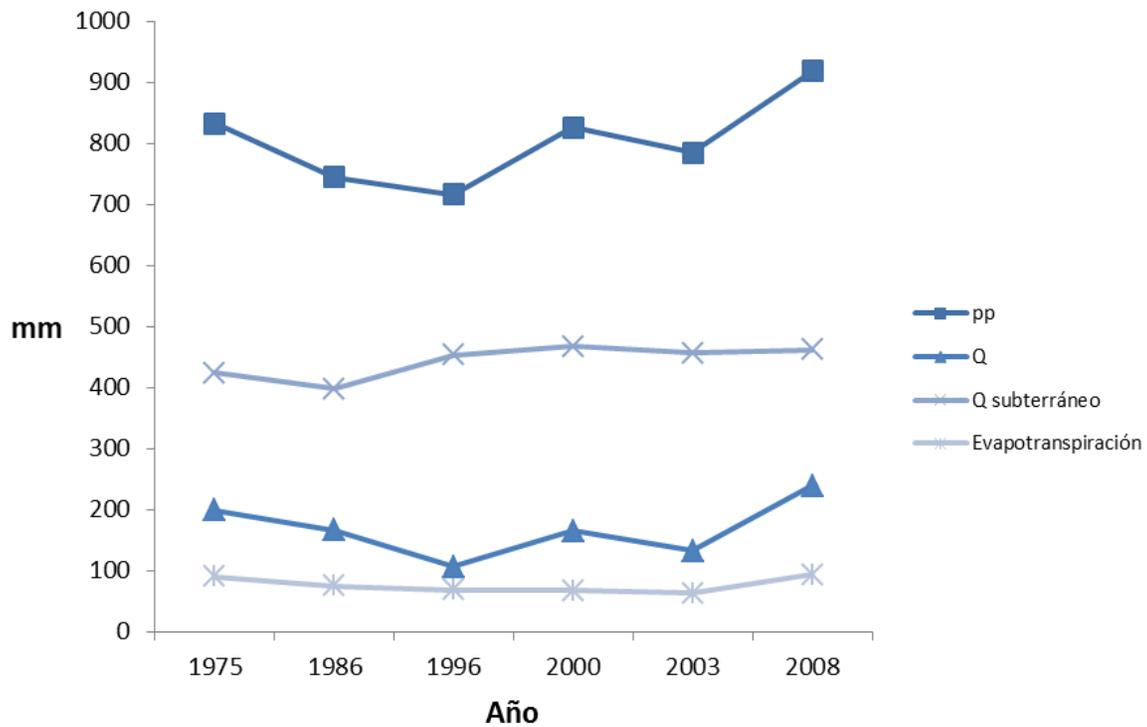


Figura 25. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT para los distintos años de cambio

Cuadro 8. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT para los distintos años de cambio

Cobertura	Año	pp (mm)	Q (mm)	Q s (mm)	Evt (mm)
1975	1975	832.01	198.37	423.71	90.27
1986	1986	744.19	166.54	397.28	74.91
1996	1996	716.15	105.9	452.52	67.78
2000	2000	825.46	165.48	466.69	67.04
2003	2003	784.03	131.84	456.65	62.48
2008	2008	918.32	238.74	462.20	93.48

Basados solamente en la revisión gráfica (Figura 26, Cuadro 8), se podría decir que el comportamiento del escurrimiento se comporta de forma similar o sigue la tendencia del comportamiento de la precipitación (pp), se podría aseverar que existe una relación directa, además el comportamiento del almacenamiento (Qs), y la evapotranspiración real (Evt), por ejemplo para el año 2008 con el dato más alto de precipitación los valores de Qs y Evt son altos. Pero la tendencia no es tan clara para el menor valor de precipitación que se aprecia para 1996, donde los valores de Qs y Evt no son los más bajos. Esto nos permite definir que no es una

relación tan simple y que hay más elementos del sistema que están afectando este comportamiento. Donde Q_s tiene que ver con las propiedades del suelo y el dato de E_{vt} tiene relación con la cobertura y el uso del terreno.

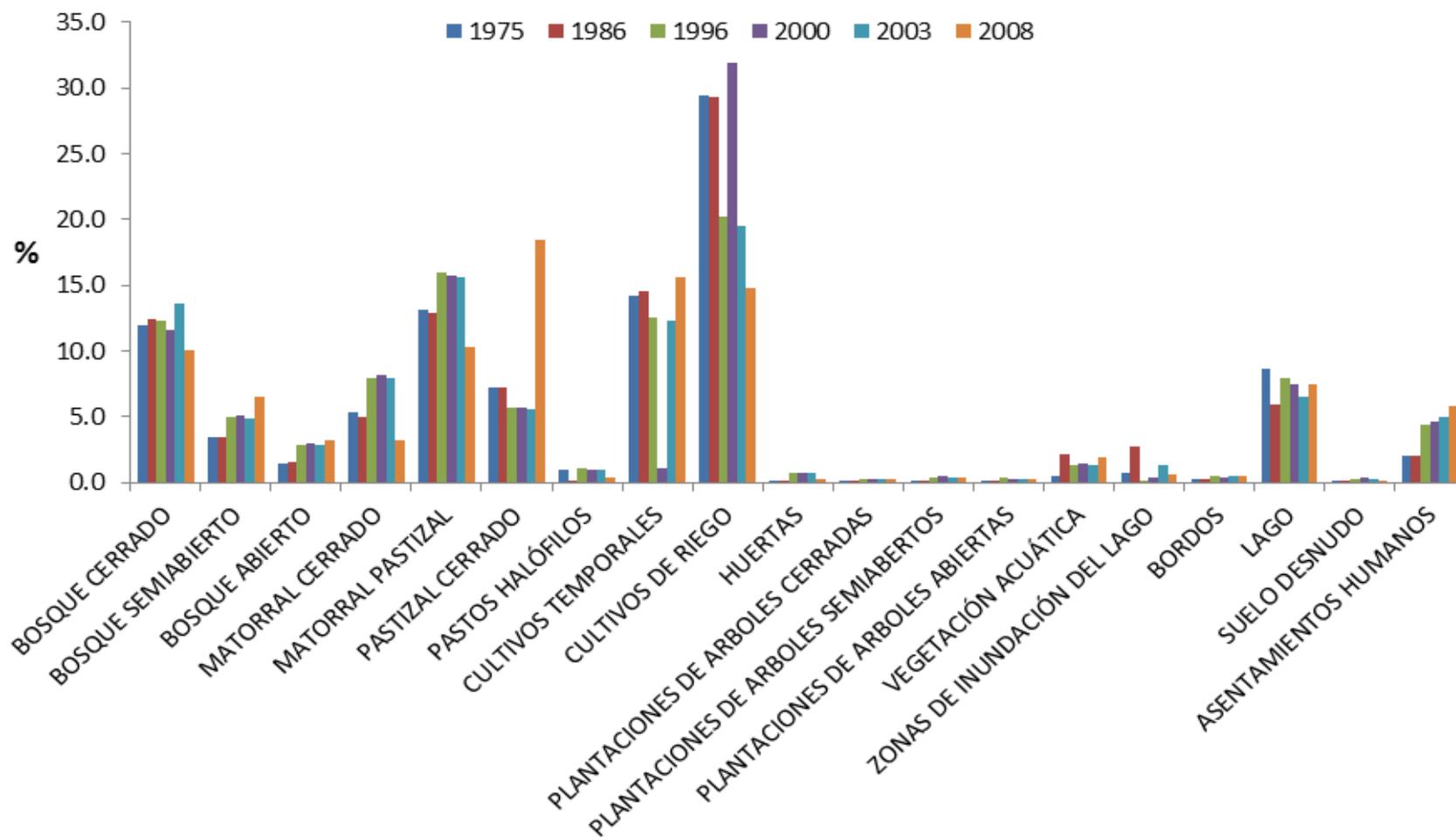


Figura 26. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para los diferentes años de cambio

Cuadro 9. Porcentaje por clase de cobertura y uso del terreno para cada año de cambio

CLASES	1975	1986	1996	2000	2003	2008
<i>Bosque cerrado</i>	12.0	12.4	12.3	11.6	13.7	10.1
<i>Bosque semiabierto</i>	3.5	3.4	4.9	5.1	4.9	6.5
<i>Bosque abierto</i>	1.4	1.5	2.9	3.0	2.9	3.2
<i>Matorral cerrado</i>	5.4	5.0	8.0	8.2	7.9	3.2
<i>Matorral pastizal</i>	13.2	12.9	16.0	15.8	15.6	10.3
<i>Pastizal cerrado</i>	7.3	7.2	5.8	5.7	5.6	18.5
<i>Pastos halófilos</i>	1.0	0.1	1.0	1.0	1.0	0.3
<i>Cultivos temporales</i>	14.2	14.6	12.6	1.1	12.3	15.7
<i>Cultivos de riego</i>	29.4	29.4	20.2	31.9	19.5	14.7
<i>Huertas</i>	0.0	0.0	0.7	0.7	0.7	0.3
<i>Plantaciones de árboles cerradas</i>	0.1	0.1	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Plantaciones de árboles semiabiertos</i>	0.1	0.1	0.4	0.5	0.4	0.3
<i>Plantaciones de árboles abiertas</i>	0.0	0.0	0.3	0.3	0.3	0.3
<i>Vegetación acuática</i>	0.5	2.1	1.3	1.4	1.4	1.9
<i>Zonas de inundación del lago</i>	0.8	2.7	0.1	0.4	1.4	0.6
<i>Bordos</i>	0.3	0.3	0.5	0.4	0.5	0.5
<i>Lago</i>	8.6	5.9	7.9	7.5	6.5	7.4
<i>Suelo desnudo</i>	0.1	0.1	0.3	0.4	0.3	0.0
<i>Asentamientos humanos</i>	2.0	2.1	4.5	4.7	4.9	5.8

Además, se realizó una simulación para cada año de análisis (1975, 1986, 1996, 2000, 2003, 2008) cambiando la cobertura existente para cada año, haciendo pruebas con cada una de las otras coberturas. Lo que se pretendió fue mantener la precipitación constante con las diferentes coberturas e indagar cual sería el comportamiento. La tendencia esperada es mayor escurrimiento para las coberturas más actuales (Figura 28, Tabla 10).

Como se puede apreciar el comportamiento es similar para todas las simulaciones, con valores altos de escurrimiento para el año de 1975, que aumentan para 1986, para 1996 el valor más bajo de escurrimiento que paulatinamente aumenta para el 2000, 2003 y 2008, este último por debajo del valor inicial de escurrimiento. Sin embargo, se comporta de manera inversa a lo simulado si hacer modificaciones.

Si hacemos una revisión más detallada, se puede apreciar que simular para un año con diferentes coberturas, es decir mantener el valor de la precipitación constante, este modelo es sensible a la cobertura. Para este tipo de simulación, aquí si se puede apreciar de manera muy clara la relación directa entre la

precipitación y el escurrimiento. Para años con menor precipitación menor escurrimiento, el ejemplo son el año 1996 y 1986. Y el caso contrario para el año 2008 con los mayores niveles de escurrimiento.

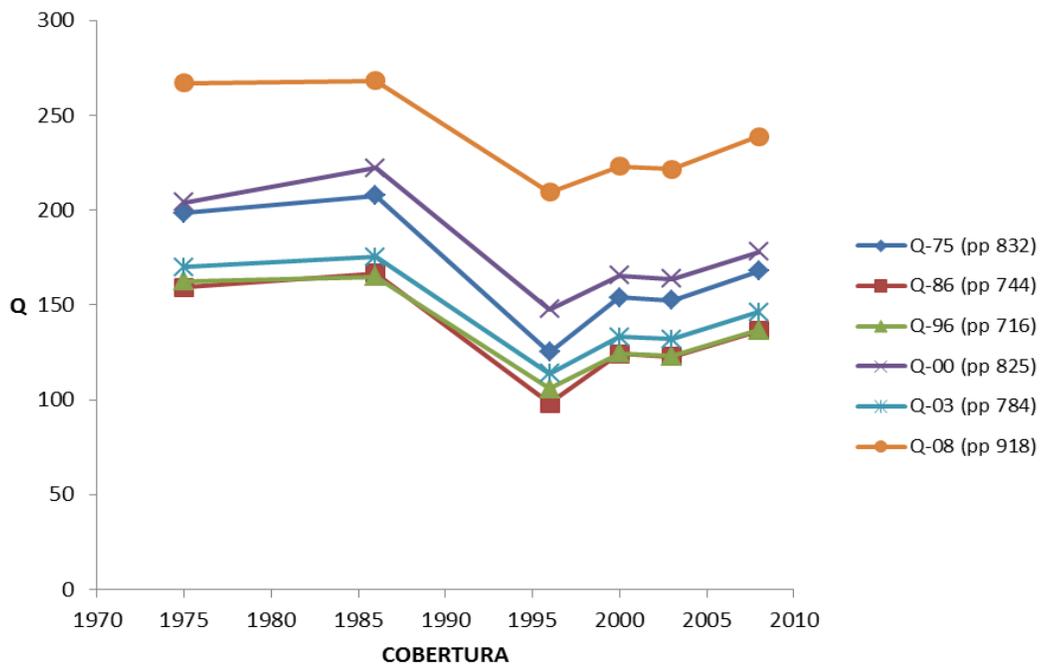


Figura 27. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT para cada año haciendo cambios en las coberturas

Cuadro 10. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT para cada año haciendo cambios en las coberturas

Cobertura	pp	Q-75
1975	832.01	198.37
1986	832.01	207.59
1996	832.01	125.17
2000	832.01	154.02
2003	832.01	152.33
2008	832.01	167.85
Cobertura	pp	Q-86
1975	744.19	159.12
1986	744.19	166.54
1996	744.19	98.05
2000	744.19	124.34
2003	744.19	122.84
2008	744.19	136.35
Cobertura	pp	Q-96
1975	716.15	162.59
1986	716.15	165.03
1996	716.15	105.9
2000	716.15	124.42
2003	716.15	122.9
2008	716.15	136.71

Cobertura	pp	Q-00
1975	825.46	204.09
1986	825.46	222.06
1996	825.46	147.75
2000	825.46	165.48
2003	825.46	163.74
2008	825.46	178.03
Cobertura	pp	Q-03
1975	784.03	169.97
1986	784.03	175.41
1996	784.03	113.88
2000	784.03	133.26
2003	784.03	131.84
2008	784.03	146.28
Cobertura	pp	Q-08
1975	918.32	267.07
1986	918.32	268.21
1996	918.32	209.34
2000	918.32	222.93
2003	918.32	221.49
2008	918.32	238.74

Por otra parte al dejar constante la cobertura y mantener la variación de la precipitación en el tiempo, se muestran los siguientes resultados (Figura 29, Cuadro 11). Lo que se trata de mostrar es el caso hipotético en que la cobertura se mantuviera a lo largo de los años de estudio, es decir, permanezca constante y solo variar la precipitación para cada año en cuestión. Las coberturas que conllevan un mayor escurrimiento son la 1986 con muy poca diferencia por encima de 1975, mientras que la cobertura para del 2008 se mantiene como intermedia, por debajo de esta se traslapan los resultados para el 2000 y el 2003; y con el menor valor de escurrimiento manteniendo la cobertura del 1996. En este caso la tendencia es muy semejante a los resultados de las simulaciones sin cambios. Pero en este caso la precipitación es la variable que afecta este comportamiento.

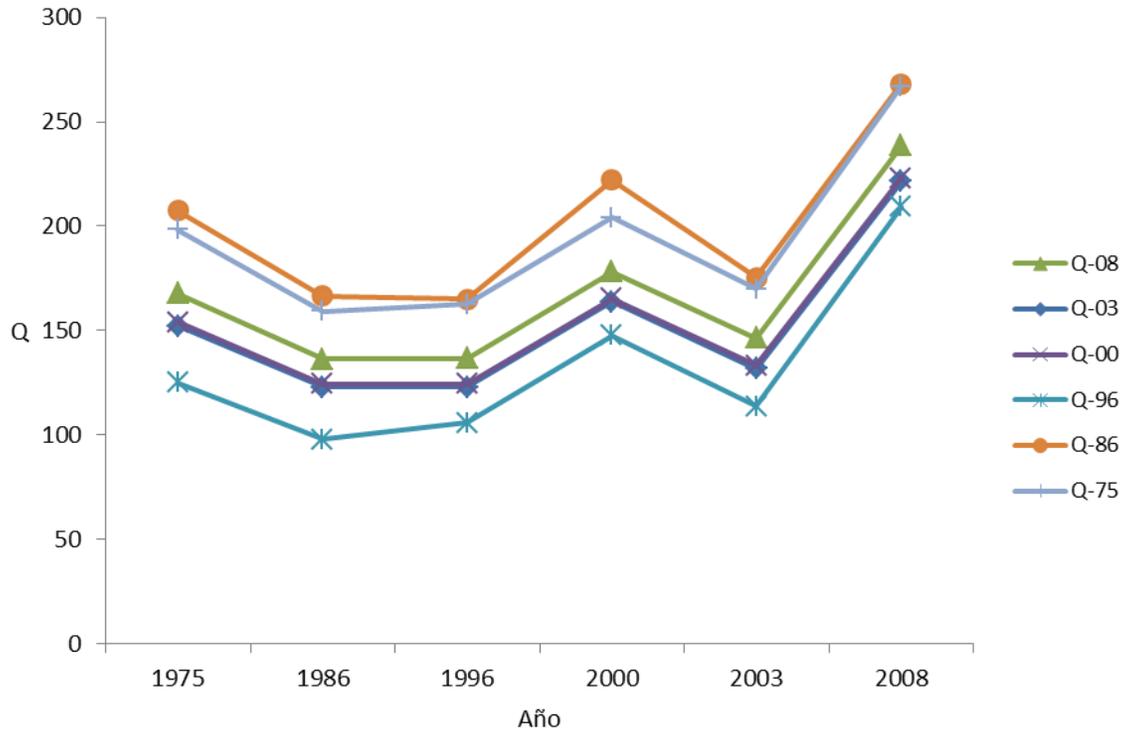


Figura 28. Comportamiento gráfico de las simulaciones realizadas por SWAT manteniendo la cobertura durante todos los años

Cuadro 11. Datos de las simulaciones realizadas por SWAT manteniendo la cobertura durante todos los años

Cobertura	Año	pp	Q-75
1975	1975	832.01	198.37
1975	1986	744.19	159.12
1975	1996	716.15	162.59
1975	2000	825.46	204.09
1975	2003	784.03	169.97
1975	2008	918.32	267.07
Cobertura	Año	pp	Q-86
1986	1975	832.01	207.59
1986	1986	744.19	166.54
1986	1996	716.15	165.03
1986	2000	825.46	222.06
1986	2003	784.03	175.41
1986	2008	918.32	268.21
Cobertura	Año	pp	Q-96
1996	1975	832.01	125.17
1996	1986	744.19	98.05
1996	1996	716.15	105.9
1996	2000	825.46	147.75
1996	2003	784.03	113.88
1996	2008	918.32	209.34

Cobertura	Año	pp	Q-00
2000	1975	832.01	154.02
2000	1986	744.19	124.34
2000	1996	716.15	124.42
2000	2000	825.46	165.48
2000	2003	784.03	133.26
2000	2008	918.32	222.93
Cobertura	Año	pp	Q-03
2003	1975	832.01	152.33
2003	1986	744.19	122.84
2003	1996	716.15	122.9
2003	2000	825.46	163.74
2003	2003	784.03	131.84
2003	2008	918.32	221.49
Cobertura	Año	pp	Q-08
2008	1975	832.01	167.85
2008	1986	744.19	136.35
2008	1996	716.15	136.71
2008	2000	825.46	178.03
2008	2003	784.03	146.28
2008	2008	918.32	238.74

Estos serían los resultados de manera global, aunque las explicaciones de las causalidades están bastante limitados y los proceso no son tan simples.

Un dato importante que explicar es que se verificaron los cambios entre fechas de cobertura, sobre las zonas de bosque y zonas urbanas, en el caso de este estudio se verifico el cambio de 1975 al 2008 con ayuda de una imagen SPOT del 2008. Para explicar en parte los cambios en el escurrimiento.

Para los resultados por subcuena se muestra sólo los resultados para dos simulaciones, una para todo el periodo, es decir, se tomará el escurrimiento por subcuenas para 1975 y se compara con los resultados obtenidos para el 2008, así como una simulación intermedia que abarca de 1975 a 1996. Aquí solo mostraremos el efecto negativo (menor escurrimiento) o positivo (mayor escurrimiento) por subcuena. Lo relevante es hacer explícito por medio de mapas espacialmente estas zonas.

Cuadro 12. Esguerrimiento en mm por subcuencia y el efecto positivo o negativo de este esguerrimiento para el año de 1975 y el 2008

Subcuencia	Q75	Q08	
1	274.58	156.91	-
2	274.63	113.63	-
3	274.61	234.26	-
4	274.63	156.90	-
5	274.62	234.26	-
6	274.79	234.38	-
7	275.80	96.35	-
8	386.28	256.19	-
9	274.57	234.22	-
10	275.70	96.33	-
11	120.86	51.64	-
12	274.46	113.57	-
13	274.53	234.18	-
14	150.27	74.52	-
15	200.79	110.20	-
16	132.74	87.89	-
17	200.72	110.15	-
18	132.81	229.51	+
19	275.62	229.90	-
20	275.77	229.95	-
21	325.21	121.33	-
22	13.26	31.15	+
23	13.30	31.17	+
24	52.12	20.85	-
27	268.50	103.58	-
28	386.68	256.52	-
29	239.33	212.87	-
30	325.07	70.49	-
31	386.33	110.12	-
32	386.35	47.72	-
35	315.90	74.11	-
37	319.89	20.84	-
38	150.38	124.85	-
39	315.96	124.70	-
40	210.81	124.86	-
43	150.25	124.71	-
44	316.28	185.00	-
45	158.14	34.50	-
46	183.01	97.40	-
47	316.19	184.94	-
48	57.47	37.49	-
49	316.16	184.92	-
50	320.38	117.98	-
51	225.37	187.18	-
52	316.10	184.85	-
53	195.58	205.51	+
54	316.08	184.80	-
55	60.45	186.65	+
56	97.44	187.10	+
57	17.27	0.34	-
58	336.76	293.69	-
59	81.12	53.23	-
60	272.13	215.18	-
61	386.36	161.17	-
62	55.92	7.43	-
63	115.51	100.70	-
64	35.04	0.34	-
65	76.41	537.71	+
66	59.99	38.69	-
67	120.85	852.65	+
68	109.45	114.79	+
69	113.29	119.74	+
70	14.00	404.11	+
71	121.74	108.73	-
72	71.68	108.69	+
73	354.25	164.05	-
74	228.03	77.04	-
75	198.31	23.85	-
76	426.13	158.02	-
77	426.29	158.11	-
78	558.98	268.02	-
79	426.10	158.01	-
80	361.33	167.74	-

Tomando solo las fechas extremas, es decir para 2008 y 1975 (Cuadro 12, Figura 30), realizando solamente la diferencia de esguerrimiento entre fechas, se intenta denotar la distribución de los cambios en el esguerrimiento en la cuencia. Podríamos definir un patrón en las zonas de mayor esguerrimiento en la zona sur. Estos patrones se asemejan a la distribución de las estaciones climáticas que realiza SWAT. Que podrían estar definiendo o limitando este comportamiento. Aunque no se descarta que los cambios de cobertura incidan en esta conducta, pero el objetivo de este estudio no se ubica en los cambios de cobertura y usos del terreno, habría que revisar estos cambios a nivel de subcuencia y definir específicamente a que se atribuye estas diferencias, aunque no debemos olvidar que no se trata solamente de un factor que influya en el esguerrimiento, sino es un conjunto de factores. La Figura 31, expresa los porcentajes de cobertura a nivel

global, podríamos atribuirlo a la reducción de los bosques cerrados y el aumento de los bosques semiabierto y abiertos. Y para las zonas con menor escurrimiento, se podría decir que se mantienen o se han conservado.

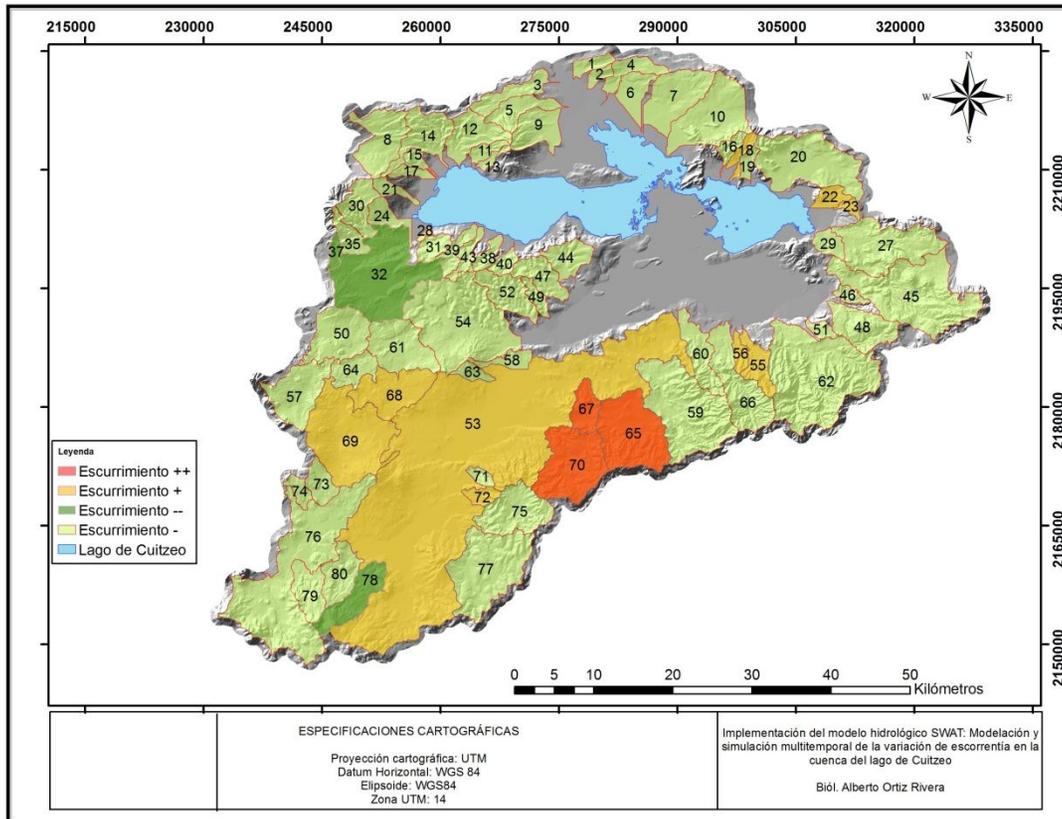


Figura 29. Mapa de distribución de escurrimiento de la diferencia de los años 1975 y 2008

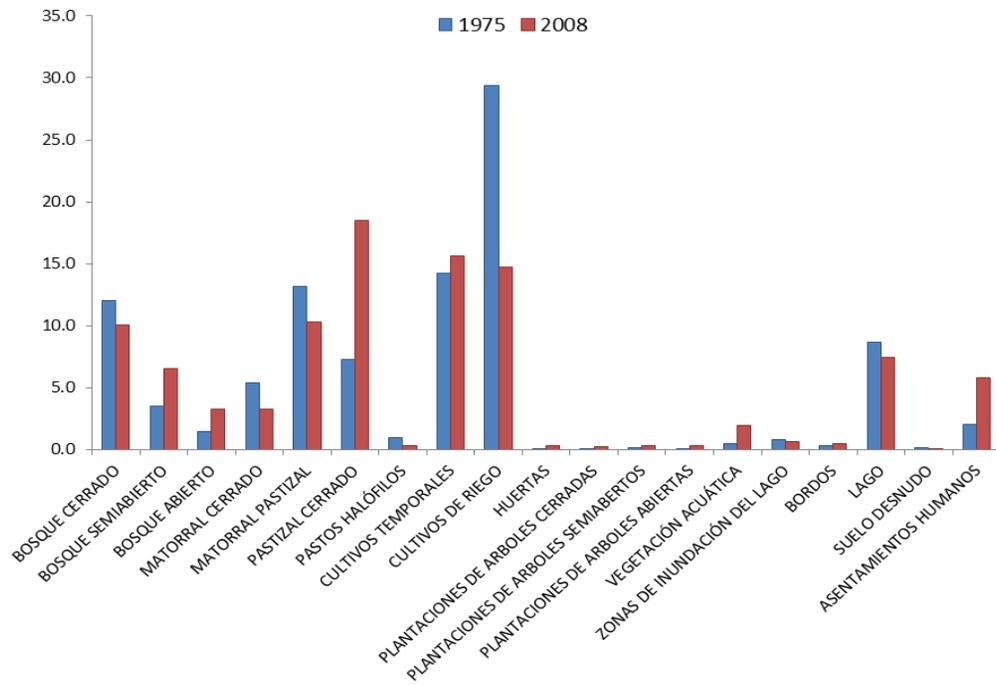


Figura 30. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para 1975 y 2008

Cuadro 13. Escurrimiento en mm por subcuenca y el efecto positivo o negativo de este escurrimiento para el año de 1975 y 1996

Subcuenca	Q75	Q96	
1	274.58	120.79	-
2	274.63	120.82	-
3	274.61	120.83	-
4	274.63	120.85	-
5	274.62	120.85	-
6	274.79	253.31	-
7	275.80	104.68	-
8	386.28	120.14	-
9	274.57	253.09	-
10	275.70	104.65	-
11	120.86	25.16	-
12	274.46	120.65	-
13	274.53	120.70	-
14	150.27	83.58	-
15	200.79	120.32	-
16	132.74	139.38	+
17	200.72	120.27	-
18	132.81	104.53	-
19	275.62	241.32	-
20	275.77	241.38	-
21	325.21	86.61	-
22	13.26	30.88	+
23	13.30	30.90	+
24	52.12	24.09	-
27	268.50	581.22	+
28	386.68	274.59	-
29	239.33	147.80	-
30	325.07	112.60	-
31	386.33	120.26	-
32	386.35	54.47	-
35	315.90	82.88	-
37	319.89	24.07	-
38	150.38	180.76	+
39	315.96	180.62	-
40	210.81	180.70	-
43	150.25	180.59	+
44	316.28	181.00	-

45	158.14	418.16	+
46	183.01	144.65	-
47	316.19	180.89	-
48	57.47	71.09	+
49	316.16	180.87	-
50	320.38	83.99	-
51	225.37	205.08	-
52	316.10	180.79	-
53	195.58	93.31	-
54	316.08	180.76	-
55	60.45	70.58	+
56	97.44	205.07	+
57	17.27	1.79	-
58	336.76	283.52	-
59	81.12	90.46	+
60	272.13	225.43	-
61	386.36	120.16	-
62	55.92	24.04	-
63	115.51	125.36	+
64	35.04	1.82	-
65	76.41	209.15	+
66	59.99	73.60	+
67	120.85	39.80	-
68	109.45	130.72	+
69	113.29	92.33	-
70	14.00	79.50	+
71	121.74	84.02	-
72	71.68	123.54	+
73	354.25	90.84	-
74	228.03	24.94	-
75	198.31	46.31	-
76	426.13	136.61	-
77	426.29	136.73	-
78	558.98	237.51	-
79	426.10	136.56	-
80	361.33	94.00	-

Ahora para el caso de una fecha intermedia, es decir para 1975 y 1996 (Cuadro 13, Figura 32). Podríamos definir patrones en las zonas de menor y mayor escurrimiento. Estos nuevamente muestran patrones que se asemejan a la distribución de las estaciones climáticas que realiza SWAT. Haciendo el análisis con el porcentaje de coberturas de la Figura 33, podríamos un menor escurrimiento atribuido al mayor nivel de los bosques cerrados para 1996 y en menor proporción de los bosques semiabiertos y abiertos, comparados con el 2008. Y para las zonas con mayor escurrimiento, se amplía a zona este, que para estos años hubo cambios en esta zona que lo favorecieron.

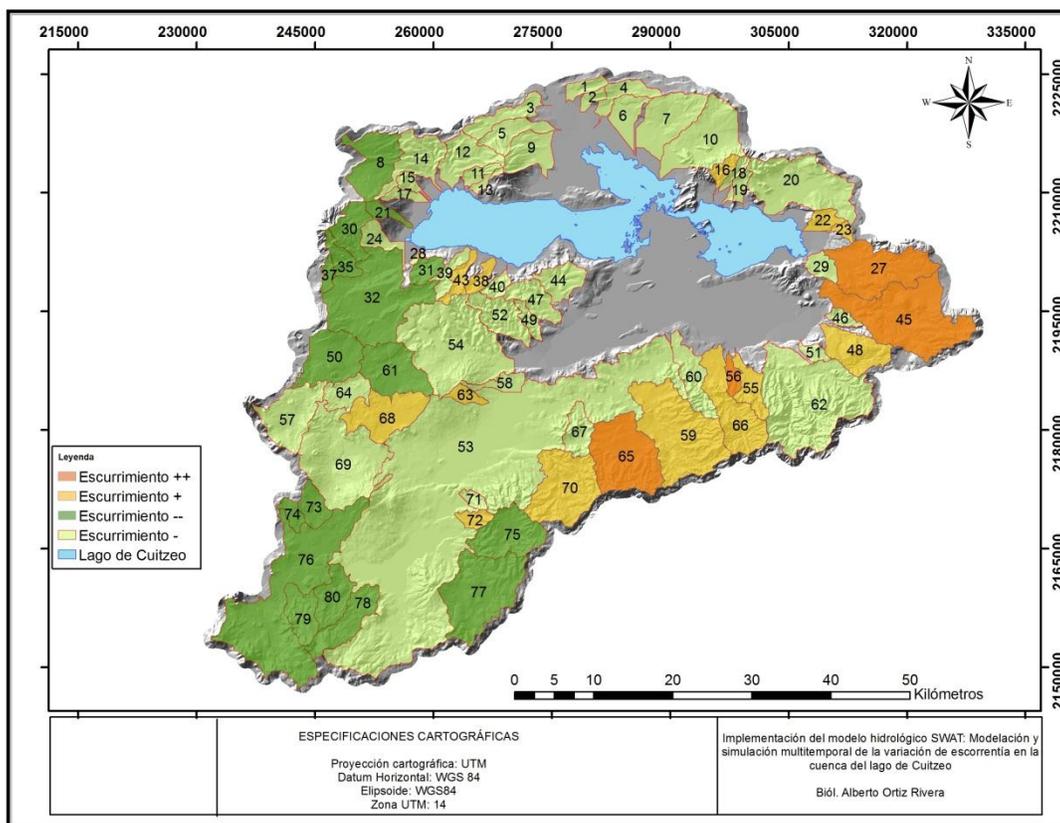


Figura 31. Mapa de distribución de escurrimiento de la diferencia de los años de 1975 y 1996

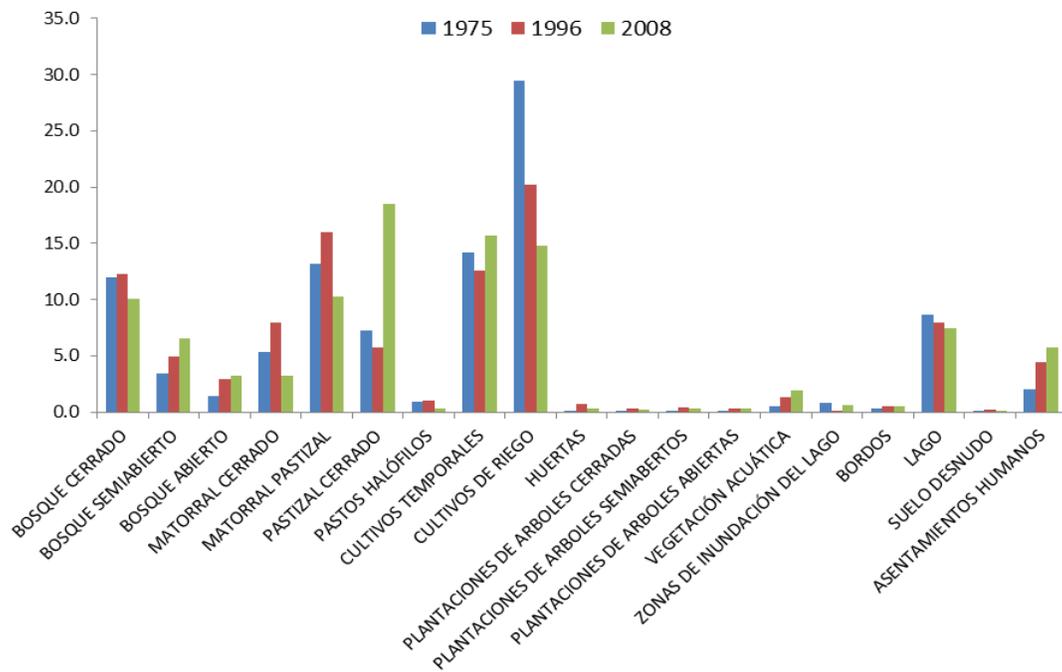


Figura 32. Porcentajes de coberturas y usos del terreno para 1975, 1996 y 2008

Capítulo IV

Discusión

Este estudio utilizó la versión SWAT2009 con la interfaz de ArcSWAT.

ArcSWAT trata de tener una estructura de menús claros, relativamente sencillo de seguir. Sin embargo, el programa presenta muchos desafíos para el usuario. El mayor desafío es la preparación de los datos para introducirlos en un formato que el modelo acepte.

El usuario está obligado a emplear un enfoque de ensayo-error hasta que el modelo acepta los datos de entrada. Este problema se ve agravando por la falta del programa de un reporte de errores.

Los requisitos del equipo y del programa de cómputo para el modelo SWAT son un tanto estrictos, pero no son imposibles de cumplir. Puede ser que sea más allá del presupuesto de una asociación de usuarios, pero es razonable para una agencia donde el SIG es ya empleado, ya que este programa requiere una inversión de capital sustancial. Aunque el modelo SWAT también está disponible para su ejecución en SIG libres como MAPWINDOWS (George y Leon, 2007), disponible en www.mapwindow.com y su extensión de SWAT se encuentra en www.waterbase.org, o su adaptación en GRASS, aunque no hay mucha documentación, lo que eliminaría una fuerte inversión en un SIG popular.

Una mayor capacidad de procesamiento del equipo hace el trabajo mucho más fácil en términos de minimizar el tiempo y permitir completar procesos altamente demandantes. Aunque en algunas ocasiones para ciertas funciones el programa no funciona o no es estable aun en sus versiones finales, o este simplemente puede dejar de responder durante el procesamiento y la simulación, entonces se requiere una computadora dedicada exclusivamente a este proceso.

Usando ArcSWAT, el usuario tiene dos áreas principales para la entrada de datos, en primer lugar, la base del delineado hidrológico se ha creado con capas SIG que representan las características físicas. Si esto se modifica de alguna manera, el modelo tiene que ser ejecutado desde el principio nuevamente. La segunda opción principal es para cambiar los datos no-espaciales, como las bases de datos que

afectan a los escenarios, lo que se puede hacerse con relativa facilidad en el "editor de bases de datos" del menú. El modelo entonces sólo se vuelve a ejecutar a través de las últimas partes del menú, para continuar con la escritura de archivos de entrada y la posterior simulación.

El usuario tiene que saber qué algoritmos se están utilizando en cada paso de los diversos procesos. Cada uno tiene sus fortalezas, debilidades y así como una área adecuada de aplicación. Esto hace que el usuario interactúe y decida el camino a seguir, esto dependerá fundamentalmente del conocimiento del modelo y las opciones que nos permite así como las condiciones del lugar y los datos de entrada con que se cuenta.

En el caso de ArcSWAT, el programa ArcGIS proporciona un conocido herramienta gráfica sólida de tratamiento previo. Sin embargo, los usuarios que no están familiarizados con los SIG pueden encontrarse con dificultades, ya que requieren algunos conocimientos especializados de los programas y la teoría de los SIG.

Otras cuestiones importantes son que utiliza simples ecuaciones empíricas para estudiar los complejos procesos hidrológicos y carece de una interfaz gráfica para la visualización y consulta de la salida. Sólo crea reportes o informes en la carpeta de trabajo. Se requiere de programas de pago para esta visualización gráfica (esto también se supera en programas libres), o generar los productos necesarios de forma manual.

SWAT ignora el efecto de los parámetros fisiografía (topografía, geología, etc.). A pesar de tener grandes manuales y documentación disponible, no se toman en cuenta o no se detallan por el modelo o que se siguen ajustando conforme el programa actualiza sus algoritmos. Sin embargo, por poner un ejemplo la geología no es tomada en cuenta por el modelo, aunque no creo que sea por la falta de visión, sino que el modelo sería más complicado. Pero aun con estas faltas, el modelo hace buenas aproximaciones, que lo acentúa que se sigue empleando y está siendo funcional a la fecha.

El modelo SWAT es limitado ya que no contempla explícitamente la inclusión de los datos espaciales como insumos del modelo, los ejemplos claros es la dificultad para añadir la capa de subcuenca generada por el usuario sin emplear el modelo, así como añadir, mapas generados con otras metodologías tanto de precipitación así como de temperatura. Los datos deben tratarse en una forma que el modelo se puede utilizar. Procesando estos datos, incluso con el uso de un SIG, es tedioso y

consumen tiempo debido al gran número de parámetros que el modelo requiera para ejecutar SWAT.

La configuración del modelo requiere la intensa recolección de datos. Los datos se recogen en diversos campos de estudio y de expertos, que incluyen cuestiones topográficas, de suelo, clima, vegetación, datos de uso del terreno, que obliga a un nivel apropiado de entendimiento. El SWAT es un modelo que exige cierta información muy detallada y en muchos casos especializada para obtener resultados más exactos. Por lo tanto la mayor parte del tiempo del estudio se dedicó a la preparación de los datos de entrada, que nunca debe ser subestimada.

Es importante también determinar el grado de fiabilidad de la información física y climática que necesita el modelo, es necesario conocer bien cuál es la fuente que la generó. Si la información temática ha sido generada por otras personas, es necesario saber quién la levantó, quien la proceso, el nivel de detalle a la que fue generada y si esta fue corroborada en el campo de manera que la persona que cuenta con esta información conozca las fiabilidad y de alguna manera pueda evitar en la medida de sus posibilidades la propagación de errores en el proceso.

Una de las desventajas del modelo SWAT es que depende en gran medida de los valores de la curva numérica para el cálculo del escurrimiento superficial. A su vez, la curva numérica depende de la definición de la cobertura vegetal y el tipo de suelo, por lo tanto los límites deben de estar definidos de manera precisa y actualizada en los mapas. Aunque este método no es suficiente para que el proceso basado en los resultados hidrológicos que reflejan el mundo real. Existen métodos alternativos como el método Green y Ampt (1911), como complementario al método curva numérica que calcula la infiltración de un modo más elaborado, aunque requiere datos de precipitación diaria como subentrada, que es más difícil de adquirir y esto conlleva mayores procesos informáticos. Ambos son modelos para estimar procesos (escorrentía o infiltración), ambos simplifican la realidad, a fin de utilizar el número mínimo de parámetros para el cálculo.

SWAT calcula el balance hídrico tomando en cuenta tres métodos para calcular la evapotranspiración, es muy recomendable hacer la generación de caudales por estos tres métodos (Hargreaves y Sammani, Penman-Monteith y Priestley-Taylor) para ver cual se ajusta mejor. Sin embargo, depende de los datos climáticos con los que se cuente, anteriormente en la descripción del modelo, se explican con detalle las variables que utiliza cada uno.

En lo referente a su base de datos sobre vegetación y cultivos los valores por defecto para el cultivo o cubierta vegetal que se seleccionaron con ayuda de gente con experiencia en el tema y las diferentes clasificaciones de vegetación, conlleva un fuerte grado de subjetividad debido a la falta de una descripción adecuada de esta base de datos y las posibles equivalencias con otras clasificaciones, tal vez existen varias posibilidades para una misma clase o simplemente la clase no se contemple o se ajuste. Habrá defectos inherentes con esta elección, ya que estas bases de datos son muy específicas o muy detalladas para ciertas especies cultivables, lo ideal sería ingresar categorías nuevas con parámetros cuantificados para la zona de estudio en particular, aunque esta tarea puede conllevar mucho tiempo y esfuerzo a fin de reclasificarlos más adecuadamente posible los datos de cobertura vegetal y uso del suelo.

Los parámetros del suelo que requiere SWAT no son fácilmente disponibles fuera de los Estados Unidos. Y donde el conjunto de datos de la FAO para suelos y sus propiedades, de alcance mundial puede ser utilizado, aunque resulta no ser exacto o de una resolución no adecuado para un estudio a escala de cuencas hidrográficas.

Los datos climatológicos no están espacialmente bien representados. La interpolación y otras técnicas estadísticas han sido esenciales para llenar lagunas en los datos, esto lleva a la reducción de la exactitud de las entradas y por ende las salidas.

Las variables climáticas que son requeridas para el modelo SWAT, deben encontrarse en un periodo diario mínimo de 10 años. Por esta razón es apropiado antes de correr el modelo confirmar la existencia de esta información climática y que se encuentren dentro de la cuenca o lo más cercano a ella.

Si el usuario prefiere para generar los valores diarios de éstos pueden ser generados con un modelo alternativo, la única condición es que estos estén de acuerdo al formato de entrada a SWAT.

La generalización de esta información esta en función del número de subcuencas y el número así como la distribución de estaciones climáticas presentes en la zona. Y esta distribución solo esta función de subcuencas, no de las HRU.

Es conveniente señalar que existen modelos más sofisticados para asignar valores de manera espacial. Para el caso de la cuenca en estudio Leal-Nares (2009), hace un análisis muy completo acerca del modelamiento de variables

climáticas para predecir su distribución. Sin embargo, con base en la interfaz de SWAT no se puede agregar un modelo propio.

A pesar de la división de las subcuencas en fracciones que corresponden a las Unidades de Respuesta Hidrológica y estas se hagan espacialmente explícitas, como los datos de salida HRU se agrupan y se pondera en un resultado para la subcuenca. Entonces la unidad más pequeña de análisis sigue siendo a nivel de subcuenca.

Para el caso particular de este estudio para la HRU, la problemática presente durante esta fase fue un error constante por parte del programa al tratar de generar estas HRU, aun haciendo diferentes combinaciones en los porcentaje de las unidades de suelo, cobertura y pendiente, debido probable a la gran heterogeneidad de la cuenca y que no se adapta tan fácil al esquema de cuenca general empleado por el modelo. Por tanto, el número de HRU fue el mínimo por subcuenca, es decir, por cada subcuenca una HRU para todos los años de cambio.

En el caso del SWAT, no permite hacer proyecciones a futuro de los datos. Solamente se puede trabajar en el periodo en el que se tenga tanto la información climática como las coberturas vegetal y uso del terreno.

De manera general es un modelo que nos demanda mucha cantidad y calidad información así como el tiempo invertido en él, sin embargo no son imposibles de recabar e interminables y esto de alguna forma nos permite conocer que datos introducimos, tal vez cual es la calidad o la deficiencia de los datos y que podemos esperar de la salida o especificar las limitantes, aunque muchos de los procesos quedan reducidos o no vemos claramente en donde se están empleando, pues el programa al simular es una caja negra. Los resultados obtenidos pueden ser comparables con trabajos previos o realizados con otras metodologías a nivel de la cuenca u otras escalas como las subcuencas que así lo permitan, es necesario calibrar y validar la información que nos aporta, sin embargo recordemos que un modelo no nos da soluciones, sino aproximaciones a ciertos cambios o toma de decisiones. Y que es un modelo que de acuerdo a lo que se menciona en la bibliografía aporta buena calidad de datos para cuencas poco aforadas como el caso de la cuenca del Lago de Cuitzeo.

Conclusiones

La recopilación de datos e integración de diversos campos de especialización y dominio de la implementación del programa del modelo son los aspectos más difíciles de establecer para ArcSWAT.

Las limitantes que presenta el SWAT, se puede resumir en que los periodos de cobertura de la información temática y la climática, muchas veces no coinciden haciendo que la simulación en muchas ocasiones nos dé resultados erróneos, aunque también un modelo sin calibración puede darlos, aun cuando coincidan los periodos de información.

Para el caso de la información climática, como se necesitan datos en un periodo mínimo de 10 años, se necesita corroborar cómo estos datos son tomados y analizar si no existen muchos vacíos porque esto de igual manera afectaría al modelamiento.

SWAT utiliza métodos simples para asignar la variabilidad espacial de los datos climáticos. La calidad de las series obtenidas mediante otros métodos, por ejemplo los geoestadísticos en otros trabajos es muy superior a las generadas por SWAT.

La utilización de los modelos hídrológicos puede ser limitada por la escasez de fuentes de información.

Los principales inconvenientes son los múltiples parámetros de entrada que utiliza el modelo (más de 200), cada uno de los cuales influye en otras partes del modelo, de forma que es posible conseguir resultados similares con distintas combinaciones de parámetros. Por ello la calibración con datos reales en algunos puntos de la cuenca, o en cuencas con similares características, es fundamental para conseguir resultados fiables.

Por tanto para el uso de modelos se requiere la opinión de expertos de las siguientes especialidades: SIG, ecología, edafólogos, biología, hidrogeología e hidrología, entre otros.

Puede no solo existir un modelo ideal para el o los objetivos del estudio que se plantee, hay que hacer una selección previa del modelo más adecuado o puede ser la combinación de dos o más modelos. De lo cual no hay mucho en la

literatura. Aunque el problema radica en los datos y el o los formatos de entrada de los diferentes programas.

La modelación hidrológica puede convertirse en una herramienta que puede aportar en el manejo y planificación de determinada cuenca. Aunque estos datos, deben ser interpretados correctamente de manera que los tomadores de decisión puedan planificar de mejor manera en base a la información que se les proporciona.

La simulación ofrece poderosas ventajas pero sufre de mayores desventajas también. Afortunadamente muchas de estas desventajas están disminuyendo en importancia en el tiempo, gracias a las herramientas que emplean simulación, metodologías, desarrollo de computadoras, programas de cómputo y decrementos en los costos de los mismos.

El uso de los modelos hidrológicos sin previa calibración y validación conduce a la sobreestimación o subestimación, mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable entre los datos observados y los medidos. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo, es recomendable y conveniente ser calibrados y validados con el mayor número de datos de escurrimiento de calidad confiable; pero bajo las condiciones de la naturaleza de la mayoría de las cuencas en nuestro país, es recomendable realizar estos procesos con los datos disponibles.

Los datos de escurrimiento nos dan una perspectiva global y reducida, sin embargo la tendencia de los datos al hacer el análisis para un año cambiando la cobertura (es decir, precipitación constante), nos muestra un panorama que no esperábamos, con un escurrimiento menor para el año de 1996 en todos los casos y para el 2008 un escurrimiento superior, pero menor al de 1975. Si consideramos esto, pensaríamos que está mejor conservado actualmente que en un inicio de las simulaciones.

Aunque sabemos que hay otros factores que afectan las simulaciones y no solo atribuirlo a los cambios de cobertura y uso del terreno. Además el área de influencia de cada subcuenca, el agrupamiento de las variables climáticas y el aporte de escurrimiento de cada una también puede ser un factor. Para el caso de simulaciones dejando permanente la cobertura muestran la misma tendencia que para las simulaciones sin ningún cambio. Habría que realizar más pruebas ahora modificando la base de datos de cultivos y uso del terreno del modelo, o tratar de

crear nuevas clases para coberturas específicas de la zona de estudio. Sin embargo la cantidad de datos es un asunto a considerar.

Considero que uno de los puntos importantes es mayor esfuerzo en el trabajo de campo para ciertos grupos de suelo, de baja dominancia o pocos representados y tener la mayor cantidad (así como calidad) de datos actuales. Esto está influyendo de alguna manera en las simulaciones. Aunque no podemos cuantificar, que tanto, solo para ese factor, aunque como sabemos no es el único.

Si bien los datos obtenidos no están calibrados, son un punto de partida en el caso de considerar implementar este modelo y conocer algunas de las limitantes asociadas, aunque es necesario hacer más pruebas modificando los datos de entrada y verificar a que parámetros es sensible.

Referencias bibliográficas

Abad, N. 2006. Modelación hidrológica de las cuencas El Chuveje y Arroyo Real como herramienta en la implementación de pago por servicios ecológicos en la Reserva de La Biosfera Sierra Gorda, Querétaro, México. Tesis de Maestría. ITESM. Monterrey, N.L. 274 pp.

Alcocer, J., 2002. Surface water-major challenges in México. LikeLine, North American Lake Management Society. USA. 22, 28-31p.

Aldama, A., 2002. Water resources in México. Like Line, North American Lake Management Society. USA. 22, 12-19p.

Arnold, J. G., M. D. Bircket, J. R. Williams, W. F. Smith y H. N. McGill. 1987. Modelling the effects of urbanization on basin water yield and reservoir sedimentation. Water Resources Bull. 23(6): 1101-1107p.

Arnold, J. G. y J. R. Williams. 1987. Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. J. Water Resour. Plan. Manage. ASCE 113(2): 243-256p.

Arnold, J. G., R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and P. M. Allen, 1999. Continental Scale Simulation of the Hydrologic Balance. Journal of the American Water Resources Association. 35 (5): 1037-1051p.

Arnold, J., Srinivasan, R., Neitsch, S., George, C., Abbaspour, K.C., Gassman, P., Fang H.H., van Griensven, A., Gosain, A., Debels, P., Kim, N.W., Somura, H., Ella, V., Leon, L., Jintrawet, A., Reyes, M.R. y Sombatpanit, S. (eds) 2009. Soil and Water Assessment Tool (SWAT): Global Applications. Special Publication No. 4., World Association of Soil and Water Conservation, Bangkok., 415pp.

Arriaga, L., J.M. Espinoza, C. Aguilar, E. Martínez, L. Gómez y E. Loa (coordinadores). 2000. Regiones terrestres prioritarias de México. Comisión Nacional para el Conocimiento y uso de la Biodiversidad. México. 439-441p.

Baker Jr., M.B., J. de D. Benavides-Solorio y E. Talavera-Zuñiga. 1995. Relationship between precipitation and streamflow on El Carrizal watershed, Tapalpa, Jalisco. Partnerships for sustainable forest ecosystem management.

General Technical Report RM-GTR-266. Rocky Mountain Forest and Range Experimental Station. Fort Collins, CO.

Barbolla Solorzano, F., 1948. Estudio del sistema actual del abastecimiento de agua potable para la ciudad de Morelia, Michoacán. Tesis de Licenciatura (Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México: 94pp.

Belmonte, S. y Núñez V., 2006. Desarrollo de modelos hidrológicos con herramientas SIG. GeoFocus (Informes y comentarios), no. 6, 15 -27p.

Benavides-Solorio, J. D., González-Guillen, C. López-Paniagua y J.R. Valdez-Lazalde. 2008. Oferta hídrica de la cuenca forestal Tapalpa, Jalisco, orientado hacia los servicios ambientales. Madera y Bosques 14(2): 5-38p.

Berlanga R.C.A., A. Ruiz-Luna, H.O. Covarrubias-Legaspi y A. Ventura-Leonardo. Cambios de los patrones de escurrimientos en la cuenca Lechuguilla-Ohuira-Navachiste, México. Memorias 6ª. Semana Geomática. Barcelona. Febrero 2005. Versión digital doc.08

Bravo-Espinosa, M., F. García-Oliva, E. Ríos-Patrón, M. Mendoza-Cantú, G. Barrera-Camacho, E. López-Granados, B. E. Serrato-Barajas y T. Sáenz-Reyes. 2008. La Cuenca del Lago de Cuitzeo: Problemática, Perspectivas y Retos Hacia su Desarrollo Sostenible. COECyT, Gobierno del Estado de Michoacán, Morelia, Michoacán, México, 32 pp.

Brooks, K.N., P.F. Folliot, H.M. Gregersen y K.W. Easter. 1991. Watershed management and upland conservation: Policy framework for sustainable development. Daft policy brief. EPAT/MUCIA. College of Natural Resources, University of Minnesota. St. Paul, MN.

Carlón Allende, T. y M. E. Mendoza., 2007. Análisis hidrometeorológico de la estaciones de la cuenca del lago de Cuitzeo. Investigaciones Geográficas 63: 56-76p.

Carranza G., E. 2005. Vegetación. En: La biodiversidad en el estado de Michoacán. Estudio de estado. Villaseñor G., L. E. y O. A. Leal-Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266pp.

CONAGUA-Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México (CONAGUA/CAVM). Documento electrónico Consultada (10 Febrero del 2008) en:

<http://www.conagua.gob.mx/ocavm/Espaniol/TmpContenido.aspx?id=510b0111-d204-4734-957a-a14f8064598c|Consejos%20de%20Cuenca|0|5|0|0|0>

Eagleson, P. S. 1991. Hydrologic Science: A Distinct Geoscience, *Rev. Geophys.*, 29(2), 237–248p.

Ersten, A.C.D. 1999. Ecohydrological impact-assessment modelling: an example for terrestrial ecosystems in Nord-Holland, The Netherlands, *Environmental Modelling and Assessment*, 4: 3-22p.

Fohrer, N. y J.G. Arnold. 2005. Editors of SWAT 2000 Development and Application: *Journal of Hydrological Processes*, Special Issue, Vol. 19: 563-859p.

Galindo, M. 2005. Water quality and its spatial variability in Lake Cuitzeo, Mexico (MSc thesis). Institute for Geo-information and Earth Observation. Enschede, Netherlands

García Castillo, J., 1949. El lago de Cuitzeo y alimentadores más importantes el río Grande de Morelia y el de Queréndaro: estudio hidrológico. Tesis de Licenciatura (Ingeniero Civil). Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México: 89pp.

García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática del Köepen. Instituto de Geografía. Universidad Nacional Autónoma de México. Serie Libros. Núm. 6. 90pp.

Garduño Monroy V.H. 2005. En Descripción Física y Biotica. –El Relieve. En: La biodiversidad en el estado de Michoacán. Estudio de estado. Villaseñor G., L. E. y O. A. Leal-Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266pp.

Gayoso, J., S. Bastienne y M. Acuña. (2000). Guía de conservación de agua. Universidad Austral de Chile. Valdivia, 139pp.

Gosain, A.K., S. Rao y D. B. Ray. 2005. Vulnearability Assement of Climate Change Impact on Indian Water Resources using SWAT Model, 3rd International SWAT, 231-240p. July 11-15, Zurich

Hargreaves, G.H. 1975. Moisture availability and crop production. Trans. ASAE 18: 980-984p.

Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1985. Reference crop evapotranspiration from temperature. Applied Engineering in Agriculture 1:96-99p.

Hargreaves, G.H. and Z.A. Samani. 1982. Estimating potential evapotranspiration. Tech. Note, J. Irrig. and Drain. Engr. 108(3):225-230p.

Hargreaves, G.L., G.H. Hargreaves, and J.P. Riley. 1985. Agricultural benefits for Senegal River Basin. J. Irrig. and Drain. Engr. 111(2):113-124p.

Hargreaves, G.H. y K. J. Vogler., 1985. Modelos hidrológicos sencillos. International Association of Hydrological Sciences. Experiencias en el desarrollo y aplicación de modelos matemáticos en hidrología y recursos hidráulicos en America Latina. Guatemala, 163-73p.

Israde, I. 1995. Bacin lacustri del setorre centrale dall'arcovolcanico mexicano. Stratigrafia ed evoluzione vulcanotettonica basata sulle diatomme. Tesis Doctoral Universia degli Sudi di Milano. 254pp.

Israde, I. 2005. Los cuerpos de agua. En: La biodiversidad en el estado de Michoacán. Estudio de estado. Villaseñor G., L. E. y O. A. Leal-Nares (Eds.). CONABIO, UMSNH, SUMA. México. 266pp.

Israde, I. y V. H. Garduño M. 1999. Lacustrine record in a volcanic intra-arc setting: the evolution of the Late Neogene Cuitzeo basin system (central-western Mexico, Michoacán). Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 151: 209-227p.

Israde, I. V.H. Garduño y R. Ortega. 2002. Paleoambiente Lacustre del Cuaternario Tardío en el centro del lago de Cuitzeo. Hidrobiológica 12 (1): 61-78p.

IUSS Working Group WRB. 2006. World reference base for soil resources 2006. World Soil Resources Reports No. 103. FAO, Rome. Documento digital.128pp.

Jain, A., S.C. Rai y E. Sharma. 2000. Hydroecological analysis of a sacred lake watershed system in relation to land-use cover change from Sikkim Himalaya, Catena, núm. 4: 263-278p.

Jackson, T. 1982. Application and selection of hydrologic models. In: Hidrologic modeling in small watersheds. ASAE Monograph 5:476-505.

Jørgensen, S. E. 1988. Fundamentals of ecological modelling. Elsevier Science Pub. Copenhagen. 389pp.

Knisel, W.G. (1980): CREAMS, a field scale model for chemicals, runoff and erosion from agricultural management systems, USDA Conservation Research Rept. N° 26.

Leal-Nares, O. A. 2009. Aspectos ecológicos y patrones de distribución de *Pinus martinenzii* Larsen en la cuenca del lago de Cuitzeo, México: Un modelo de distribución potencial aplicado a la conservación. Tesis de Maestría. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 180 pp.

López, E., G. Bocco, M. Mendoza, A. Velázquez y R. Aguirre, 2006. Peasant emigration and land-use change at the watershed level. A GIS-based approach in Central Mexico. *Agricultural Systems* 90 (1-3): 62-78p.

Madrigal Sánchez, X. y Guridi, L., 2004. Riqueza de la vegetación en la región Morelia. En: Garduño Monroy, V.H. (Ed.), 2004. Contribuciones a la Geología e Impacto Ambiental de la Región Morelia. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas, México: 156-166p.

Mapfumo, E., D. S. Chansyk y W. D. Williams. 2004. Simulating daily soil water under foothills fescue grazing with the soil and water assessment tool model (Alberta, Canada). *Hydrol. Process.* 18: 2787-2800p.

Mendoza C., M.E. 2002. Implicaciones del cambio de cobertura vegetal y uso del suelo en el balance hídrico a nivel regional. El caso de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Tesis de Doctorado. Instituto de geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México. México. 188 pp.

Mendoza, M., E. López y G. Bocco. 2001. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS-CONACYT. Michoacán

Mendoza, M.E., G. Bocco y M. Bravo. 2002. Spatial prediction in hydrology: status and implications in the estimation of hydrological processes for applied research. *Progress in Physical Geography*, 26 (3): 319-338p.

Mendoza, M.E., Gerardo Bocco y E. López Granados. 2004. Evaluación de la calidad espacial y temporal de estaciones meteorológicas. El caso de la cuenca del lago de Cuitzeo. *Ciencia Nicolaita* 39: 79 – 94p.

Mendoza, M.E., Gerardo Bocco y E. López Granados. 2005. Insumos y herramientas de análisis a escala regional del efecto hidrológico del cambio de la cobertura vegetal y uso del suelo. *Ciencia Nicolaita* 41: 55 – 67p.

Mendoza, M.E., G. Bocco, E. López y M. Bravo. (en prensa). Hydrological implications of land-cover and land-use change: Spatial analytical approach at regional scale in the closed basin of the Cuitzeo Lake, Michoacán, México. *Singapore Tropical Geography*.

Mendoza, M.E., D.I. González Terrazas, D. Geneletti, L.M. Morales Manilla, E. López, I. Israde y Z. Vekerdy. 2008. Uso de técnicas de análisis multicriterio para la priorización de subcuencas y municipios para la conservación, restauración y el aprovechamiento de los recursos naturales en la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Informe final presentado al Fondo Mixto CONACYT-Estado de Michoacán. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental, Universidad Nacional Autónoma de México

Mendoza, M.E., E. López Granados, D. Geneletti, D.R. Pérez-Salicrup y V. Salinas. 2010. Analysing land cover and land use change processes at watershed level: A multitemporal study in the Lake Cuitzeo Watershed, Mexico (1975-2003). *Applied Geography*

Morgan, R. P. C. 1986. *Soil erosion and conservation*. New York: Longman. 385pp.

Murillo, M.E. 2002. Estudio del Efecto del Cambio del Uso del Suelo en el Escurrimiento en la Subcuenca 24Bf “Monterrey”, aplicando un Sistema de Información Geográfica. Tesis de Maestría ITESM, Campus Monterrey. 119pp.

Naylor, H.T., J.L. Balintfy, D. S. Burdick, K. Chu. 1966. *Computer Simulation Techniques*. John Wiley and Sons, New York-London-Sidney-Toronto. 352pp.

Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., King, K.W. (2002). Soil and water assessment tool. Theoretical documentation. Version 2000, Blackland Research Center and Grassland Soil and Water Research Laboratory, Temple, Texas, USA.

Ndomba, P.M. y B.Z. Birhanu. 2008. Problems and Prospects of SWAT Model Applications in NILOTIC Catchments: A Review. Nile Basin Water Engineering Scientific Magazine. Vol. 1: 41-52p.

Ortega, J. M. 2003. Evaluación multicriterio y sistemas espaciales de toma de decisiones aplicados a la planeación del uso de suelo en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 146pp.

Pasquarè, G., L. Ferrari, V.H. Garduño, A. Bibaldi y L. Vezzoli, 1991. Geologic map of central sector of Mexican Volcanic Belt, State of Guanajuato and Michoacán, México. Map and Chart Series MCH072. Geological Society of America

Pérez-Maqueo, O., A. Delfín-Alfonso, A. Fregoso, H. Cotler, M. Equihua. (2006). Modelos de simulación para la elaboración y evaluación de los programas de servicios ambientales hídricos. Gaceta Ecológica, No. 78, 47-66p.

Ponce, V.M. 1989. Engineering Hydrology. Principles and Practices. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, USA. 640pp.

Pulido, J., J. Pérez y S. Martínez. 2001. Los suelos de la Cuenca de Cuitzeo. En: Mendoza, M., E. López y G. Bocco. Regionalización ecológica, conservación de recursos naturales y ordenamiento territorial de la cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán. Universidad Nacional Autónoma de México. Programa SIMORELOS-CONACYT. Michoacán

Robles del V., J. S. 2006. Diversidad de la Familia Cactaceae en la Cuenca de Cuitzeo, Michoacán y Guanajuato, México. Tesis de Maestría. Facultad de Biología. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. México. 124pp.

Sahagian, D. 2000. Global physical effects of anthropogenic hydrological alterations: sea level and water redistribution, Global 2nd planetary change, 25. 39-48p.

Semarnat. Informe de la Situación del Medio Ambiente en México. Edición 2008. Compendio de Estadísticas Ambientales. México.

Schmidt, G. y M. Volk. 2005. Effects of Input Data Resolution on SWAT Simulations-A Case study at the EMs River Basin (North Western Germany). 3rd Internation SWAT, 241-250p. July 11-15 Zurich.

Soto-Galera E, Paulo-Maya J, López-López E, Serna-Hernández JA, Lyons J. 1999. Environmental Auditing Change in Fish Fauna as Indication of Aquatic Ecosystem Condition in Río Grande de Morelia–Lago de Cuitzeo Basin Mexico. *Environmental Management* 24 (1), 133 – 140p.

Torres-Benites, E., D. S. Fernández-Reynoso, J. L. Oropeza-Mota, E. Mejía-Saenz. 2004. Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca "El Tejocote", Atlacomulco, Estado de México. *TERRA Latinoamericana*, num. Octubre-Diciembre, 437-444p.

Trucios, R., J. G. Martínez, J. L. Blando, I. Sánchez. 2007. Calibración y validación del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Sextin en Durango, México. *Revista Chapingo Serie Zonas Aridas*. 6: 91-101p.

U.S. Department of Agriculture (USDA), Natural Resources Conservation Service (NRCS), 1986, Urban Hydrology for Small Watersheds: U.S. Department of Agriculture, Natural Resources Conservation Service, Engineering Division, Technical Release 55, 210-VI-TR-55, cap. 2, 2a edición, 1-16p.

USDA-SCS (U.S. Department of Agriculture-Soil Conservation Service), 1972. National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, Section 4, U.S. Government Printing Office, Washington, D.C.

Villarroel, A. (2003.). Proyecto Shetran, Manejo de cuencas hidrográficas en Chile: aplicación del sistema hidrológico Europeo (SHETRAN) en una microcuenca cordillerana a problemas de inundación., Universidad de Chile, Facultad de Ciencias, Departamento de Ciencias Ecológicas. Documento electrónico. Consultado (20 noviembre 2008) en:

http://www.gobiernosantiago.cl/universitario/download/tesis/medio_ambiente/informe_intend.pdf

von Bertalanfy, L., 1976. Teoría general de los sistemas. Fundamentos, desarrollo, aplicaciones. Fondo de Cultura Economica. México 311pp.

Watson I. y Burnett AD 1995. Hidrology: An environmental approach – Theory and applications of ground water and surface water enginners and geologist. Boca Raton: Lewis Publishers

Watson, B.M., N. Coops., S. Selvalingam y M.Ghafouri. 2005. Integration of 3-PG into SWAT to Simulate the Growth of Evergreen Forests. 3rd International SWAT. July 11-15, Zurich.

Williams, J.R., Jones, C.A., Dyke, D.D. (1984): A modeling approach to determining the relationship between erosion and soil productivity, Trans. ASAE 27(1): 129-144p.

Winchell, M.. R. Srinivasan, M. Di Luzio, J. Arnold. ArcSWAT Interface for SWAT User's Guide. Blackland Research Center, Texas Agricultural Experiment station and USDA Agricultural Research Service 2009.

ANEXO 1

Las características generales de las unidades de suelo (IUSS Grupo de Trabajo WRB, 2007):

ACRISOL: Los Acrisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que llevan a un horizonte *árgico* en el subsuelo. Los Acrisoles tienen en determinadas profundidades una baja saturación con bases y arcillas de baja actividad. Muchos Acrisols correlacionan con *Red Yellow Podzolic soils* (e.g. Indonesia), *Argissolos* (Brasil), *sols ferralitiques fortement ou moyennement désaturés* (Francia), *Red and Yellow Earths*, y *Ultisoles* con arcillas de baja actividad (Estados Unidos de Norteamérica).

ANDOSOLES: Los Andosoles acomodan a los suelos que se desarrollan en eyecciones o vidrios volcánicos bajo casi cualquier clima (excepto bajo condiciones climáticas hiperáridas). Sin embargo, los Andosoles también pueden desarrollarse en otros materiales ricos en silicatos bajo meteorización ácida en climas húmedo y perhúmedo. Muchos Andosoles pertenecen a: *Kuroboku* (Japón); *Andisoles* (Estados Unidos de Norteamérica); *Andosoles* y *Vitrisols* (Francia); y *suelos sobre ceniza volcánica*.

CAMBISOLES: Los Cambisoles combinan suelos con formación de por lo menos un horizonte subsuperficial incipiente. La transformación del material parental es evidente por la formación de estructura y decoloración principalmente parduzca, incremento en el porcentaje de arcilla, y/o remoción de carbonatos. Otros sistemas de clasificación de suelos se refieren a muchos Cambisoles como: *Braunerden* (Alemania), *Sols bruns* (Francia), *Brown soils/Brown Forest soils* (antiguos sistemas norteamericanos), o *Burozems* (Federación Rusa). FAO acuñó el nombre *Cambisoles*, adoptado por Brasil (*Cambissolos*); la Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos clasifica a la mayoría de estos suelos como *Inceptisoles*.

GLEYSOLES: Los Gleysoles son suelos de humedales que, a menos que sean drenados, están saturados con agua freática por períodos suficientemente largos para desarrollar un característico *patrón de color gléyico*. Este patrón está esencialmente hecho de colores rojizos, parduzcos o amarillentos en la cara de los agregados y/o en la capa o capas superficiales del suelo, en combinación con colores grisáceos/azulados en el interior de agregados y/o más profundo en el suelo. Nombres comunes para muchos Gleysoles son: *gley* y *suelos de prados* (*meadow*) (antigua Unión Soviética); *Gleyzems* (Federación Rusa); *Gleye* (Alemania); *Gleissolos* (Brasil); y *gsuelos con agua freática* (*groundwater soils*). Muchos de los Gleysoles de la WRB correlacionan con los subórdenes ácuicos de

la Taxonomía de Suelos norteamericana (*Acualfes, Acuentes, Acueptes, Acuoles*, etc).

LEPTOSOLES: Los Leptosoles son suelos muy someros sobre roca continua y suelos extremadamente gravillosos y/o pedregosos. Los Leptosoles son suelos azonales y particularmente comunes en regiones montañosas. Los Leptosoles incluyen los: *Litosoles* del Mapa de Suelos del Mundo (FAO–UNESCO, 1971–1981); subgrupos *Lítico* del orden *Entisol* (Estados Unidos de Norteamérica); *Leptic Rudosols* y *Tenosols* (Australia); y *Petrozems* y *Litozems* (Federación Rusa). En muchos sistemas nacionales, los Leptosoles sobre roca calcárea pertenecen a las *Rendzinas*, y aquellos sobre otras rocas, a los *Rankers*. La roca continua en la superficie se considera no suelo en muchos sistemas de clasificación de suelos.

LUVISOLES: Los Luvisoles son suelos que tienen mayor contenido de arcilla en el subsuelo que en el suelo superficial como resultado de procesos pedogenéticos (especialmente migración de arcilla) que lleva a un horizonte subsuperficial *árgico*. Los Luvisoles tienen arcillas de alta actividad en todo el *horizonte árgico* y alta saturación con bases a ciertas profundidades. Muchos Luvisoles son o fueron conocidos como: *suelos texturales-metamórficos* (Federación Rusa), *sols lessivés* (Francia), *Parabraunerden* (Alemania), *Chromosols* (Australia), *Luvissolos* (Brasil), *Grey-Brown Podzolic soils* (terminología antigua de los Estados Unidos de Norteamérica), y *Alfisolos* con arcillas de alta actividad (Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos).

PHAEOZEMS: Los Phaeozems acomodan suelos de pastizales relativamente húmedos y regiones forestales en clima moderadamente continental. Los Phaeozems son muy parecidos a Chernozems y Kastanozems pero están más intensamente lixiviados. Consecuentemente, tienen horizonte superficial oscuro, rico en humus que, en comparación con Chernozems y Kastanozems, son menos ricos en bases. Los Phaeozems pueden o no tener carbonatos secundarios pero tienen alta saturación con bases en el metro superior del suelo. Nombres usados comúnmente para los Phaeozems son: *Brunizems* (Argentina y Francia); *Suelos gris oscuro de bosque* y *Chernozems lixiviados y podzolizados* (antigua Unión Soviética); *Tschernoseme* (Alemania); *Dusky-red prairie soils* (antigua clasificación de Estados Unidos de Norteamérica); *Udoles* y *Alboles* (Taxonomía de Suelos de los Estados Unidos); y *Phaeozems* (incluyendo la mayoría de los antiguos *Greyzems*) (FAO).

PLANOSOLES: Los Planosoles son suelos con un horizonte superficial de color claro que muestra signos de estancamiento de agua periódico y suprayace abruptamente un subsuelo denso, lentamente permeable con significativo incremento de arcilla respecto del horizonte superficial. La clasificación de suelos de Estados Unidos acuñó el nombre *Planosoles* en 1938; su sucesor, la Taxonomía de Suelos de Estados Unidos, incluye la mayoría de los Planosoles original en los Grandes Grupos de *Albacualfes*, *Albacuultes* y *Argialboles*. El nombre ha sido adoptado en Brasil (*Planossolos*).

REGOSOLES: Los Regosoles forman un grupo remanente taxonómico que contiene todos los suelos que no pudieron acomodarse en alguno de los otros GSR. En la práctica, los Regosoles son suelos minerales muy débilmente desarrollados en materiales no consolidados que no tienen un horizonte *mólico* o *úmbrico*, no son muy someros ni muy ricos en gravas (*Leptosoles*), arenosos (*Arenosoles*) o con materiales *flúvicos* (*Fluvisoles*). Los Regosoles están extendidos en tierras erosionadas, particularmente en áreas áridas y semiáridas y en terrenos montañosos. Muchos Regosoles correlacionan con taxa de suelos que están marcados por formación de suelos incipiente tal como: *Entisoles* (Estados Unidos de Norteamérica); *Rudosols* (Australia); *Regosole* (Alemania); *Sols peu évolués régosoliques d'érosion* o aún *Sols minéraux bruts d'apport éolien ou volcanique* (Francia); y *Neossolos* (Brasil).

SOLONCHACKS: Los Solonchaks son suelos que tienen alta concentración de sales solubles en algún momento del año. Los Solonchaks están ampliamente confinados a zonas climáticas áridas y semiáridas y regiones costeras en todos los climas. Nombres comunes internacionales son *suelos salinos* y *suelos afectados por sales*. En sistemas nacionales de clasificación de suelos, muchos Solonchaks pertenecen a: *suelos halomórficos* (Federación Rusa), *Halosols* (China), y *Salides* (Estados Unidos de Norteamérica).

VERTISOLES: Los Vertisoles suelos muy arcillosos, que se mezclan, con alta proporción de arcillas expandibles. Estos suelos forman grietas anchas y profundas desde la superficie hacia abajo cuando se secan, lo que ocurre en la mayoría de los años. El nombre Vertisoles (del latín *vertere*, dar vuelta) se refiere al reciclado interno constante del material de suelo. Nombres comunes locales para muchos Vertisoles son: *suelos negros de algodón, regur* (India), *black turf soils* (Sudáfrica), *margalites* (Indonesia), *Vertosols* (Australia), *Vertissolos* (Brasil), y *Vertisoles* (Estados Unidos de Norteamérica).

ANEXO 2

DESCRIPCIÓN Grupo de suelo hidrológico	
BAJO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA. Suelos que tienen alta tasa de infiltración aun cuando estén muy húmedos. Consisten de arenas o gravas profundas bien excesivamente drenados. Estos suelos una alta tasa de transmisión de agua.	A
MODERADAMENTE BAJO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA. Suelos con tasa de infiltración moderada cuando están muy húmedos. Suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a drenados, textura moderadamente finos a moderadamente gruesos, y permeabilidad moderadamente lenta a moderadamente rápida. Son suelos con tasas de transmisión de agua moderada.	B
MODERADAMENTE ALTO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA. Suelos con infiltración lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos con un estrato que impiden el movimiento del agua hacia abajo; suelos de textura moderadamente finas a finas; suelos con infiltración lenta debido a las sales o álcali, o suelos con niveles freáticos moderados. Estos suelos pueden ser pobremente drenados o bien a moderadamente bien drenados, con estratos de permeabilidad lenta a muy lenta a poca profundidad (50-100cm).	C
ALTO POTENCIAL DE ESCORRENTÍA. Suelos con infiltración muy lenta cuando están muy húmedos. Consisten de suelos arcillosos con alto potencial de expansión; suelos con nivel freático alto permanente; suelos con estrato arcilloso superficial; suelos con infiltración muy lenta debido a las sales o álcali, y suelos poco profundos sobre materiales casi impermeable. Estos suelos tiene tasas de transmisión muy lenta.	D

Referencia: Hidrología en la Ingeniería, Germán Monsalve Sáenz, 1999.